

Торайғыров университетінің хабаршысы
ҒЫЛЫМИ ЖУРНАЛЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайғыров университета

Торайғыров университетінің ХАБАРШЫСЫ

Энергетикалық сериясы
1997 жылдан бастап шығады



ВЕСТНИК Торайғыров университета

Энергетическая серия
Издается с 1997 года

ISSN 2710-3420

№ 3 (2025)

ПАВЛОДАР

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Вестник Торайғыров университета

Энергетическая серия
выходит 4 раза в год

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о постановке на переучет периодического печатного издания,
информационного агентства и сетевого издания

№ 14310-Ж

выдано

Министерство информации и общественного развития
Республики Казахстан

Тематическая направленность

публикация материалов в области электроэнергетики,
электротехнологии, автоматизации, автоматизированных и
информационных систем, электромеханики и теплоэнергетики

Подписной индекс – 76136

<https://doi.org/10.48081/TPDW7598>

Бас редакторы – главный редактор

Талипов О. М.

доктор PhD, ассоц. профессор (доцент)

Заместитель главного редактора

Калтаев А.Г., доктор PhD

Ответственный секретарь

Сағындық Ә.Б., доктор PhD

Редакция алкасы – Редакционная коллегия

Клецель М. Я.,	д.т.н., профессор
Никифоров А. С.,	д.т.н., профессор
Новожилов А. Н.,	д.т.н., профессор
Никитин К. И.,	д.т.н., профессор (Российская Федерация)
Алиферов А. И.,	д.т.н., профессор (Российская Федерация)
Кошеков К. Т.,	д.т.н., профессор
Приходько Е. В.,	к.т.н., профессор
Кислов А. П.,	к.т.н., доцент
Нефтисов А. В.,	доктор PhD
Шокубаева З. Ж.	технический редактор

За достоверность материалов и рекламы ответственность несут авторы и рекламодатели

Редакция оставляет за собой право на отклонение материалов

При использовании материалов журнала ссылка на «Вестник Торайғыров университета» обязательна

МАЗМУНЫ

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENT

Алдиарбек Н. Е., Онгар Б., Дүйсенбек Ж. С.,

Маханова М. А., Егзекова А. Т.

Жел қондырғысының жағдайын бақылау үшін жел қондырғысы
эмуляторын модельдеу және әзірлеу6

Амренова А. Ж., Достияров А. М., Яманбекова А. К.,

Мусаева Ж. К.

Исследование конструкций и характеристик горелок водогрейных
котлов малой и средней мощности21

Балтин А. Т., Исаева Ж. Р., Бердалиев А. Д.

Использование и влияние виз в повышении Энергоэффективности
распределительных сетей напряжением 20кв33

Бекбаев А. Б., Ахамбаев Р. С., Минажова С. А.,

Бердімұрат А. Д., Налибаев Н. Ж.

Энергоэксплуатация зданий для обеспечения устойчивости
С интегрированными возобновляемыми источниками энергии.....51

Biloshchytskyi A., Kuchanskyi O., Andrashko Y., Biloshchytska S.,

Medetbek A.

Predictability of Mining Wastewater Pollution Based on Fractal
Time Series Analysis65

Генбач А. А., Бондарцев Д. Ю.

Охлаждение лопаток перспективных паровых
турбин кипящими жидкостями76

Глуценко Т. И., Бедыч Т. В., Бижанов Н. У.,

Утебаев Д. Н., Имангазинова Д. К.

исследование Автономной системы теплоснабжения с применением
карбонового теплонагревателя93

Darimbayeva N., Sakitzhanov M., Toygozhinova Zh.,

Zharkymbekova M.

Kazakhstan's energy transformation: How green technologies
can change The future.....109

Дюсова Р. М., Жакманова Е. А., Сейтенова Г. Ж.

Оптимизация тепловых потоков и режимов для повышения
энергоэффективности каталитического риформинга126

Жалмагамбетова У., Крыкбаева М., Шимпф А.,

Казамбаев А., Снопков Д.

Эффективное решение задачи данных по радиоканалу
для автономных станций экологического мониторинга139

Ivanov V. A., Kotov Ye. S., Daich L. I., Lissitsyn D. V.,

Potyomkina Ye. B.

Analysis of switching modes transient processes

in high-voltage electrical networks	149
Исабеков Ж. Б., Исабекова Б. Б., Ордабаев Б. Е., Жантлессова А. Б., Есмаханова Л. Н.	
Жерге тұйықталу тоғын анықтаудың эксперименттік әдістері.....	163
Исабеков Д. Д.	
Кернеуі 1000-ға дейінгі электрқондырғыларына арналған Ресурс үнемдеу конструкциясы	174
Карманов А. Е., Уахит Н. Ә., Парамонов А. М.	
Прогнозирование удельного электрического сопротивления прокаленного нефтяного кокса с использованием искусственного интеллекта.....	186
Кустаулетов Ы. С., Танырберген Н. М., Талипов О. М., Жакупов Т. М.	
Шетелде және қазақстанда қамыстан, мысыққұйрықтан энергия алуды зерттеу	203
Құттыбай Н. Б., Сыбанбаева Д. К., Орынбасар С. О., Каппарова А. А., Болатбек А. Б.	
Исследование влияния типов контроллеров на выходную мощность фотоэлектрических систем	217
Мендыбаев С. А., Нарынбаев Д. С., Анарбаев А. Е., Дубинец Н. А., Абдрахманов Б. Т.,	
Компрессорлық станцияның автоматтандырылған басқару жүйесінің математикалық моделін әзірлеу.....	232
Нешина Е. Г., Мехтиев А. Д., Калиаскаров Н. Б., Алькина А. Д., Мукашева Д. Т.	
Исследование эффективности передачи Электрической мощности по оптическому волокну	244
Нефтисов А. В., Кириченко Л. Н., Казамбаев И. М., Командиров Е. В., Белощицкий Е. А.	
Концепт аппаратно-программного комплекса определения расхода воды в реках с применением кросс-корреляционного метода	255
Новожилов А. Н., Исенов Ж. С., Новожилов Т. А.	
Частичные разряды, причины их возникновения и последствия.....	268
Нұрмағанбетова Г. С., Каверин В. В., Эм Г. А., Исенов С. С., Дружинин В. М.	
Жел турбинасының электр механикалық бөлігіндегі қысқа тұйықталу режимдерін математикалық және имитациялық моделдеу.....	279
Нурсеитов Б. А., Хидолда Е., Бердибеков А. О., Марат Н. О.	
Имитационное моделирование системы автономной малой солнечной электростанции.....	291
Отаров Zh. M., Zhukenova G. A., Sakanov K. T., Mussakhanova S. T., Zhakanov A. N.	
Development of ash-soil composite material based on waste from thermal power engineering.....	309

Сакенов Б. К., Кошкин И. В., Успанова А. И., Кислов А. П.	
Қостанай өңірінде жабық топырақ жағдайында өсімдіктердің өнімділігін реттеу үшін жэк қолданудың негіздемесі	321
Сәбиболда Ә. М., Смайлов Н. Қ., Тулешов А. К., Сағындық А. Б., В. В. Наумов	
Радиосигналдарды спектрлік-корреляциялық өңдеу міндеттері үшін математикалық модельдеу	337
А. А. Поддубный, Н. А. Какабаев, А. Т. Кабдулина, Ж. Ж. Байжолова⁴, Р. А. Поддубный	
Исследование процесса переноса теплоты при движении газо-жидкостных систем в вертикальных трубах.....	348
Тайсариева К. Н., Таштай Е., Бекенов Е., Джахметов А., 5G желілерінде iot трафиінің өткізу қабілетін болжау үшін LSTM алгоритмін қолдануды зерттеу.....	362
Утепберген И. Т., Сейтбекова А. М., Абжанова Л. К.	
Применение искусственного интеллекта для перехода к проактивной модели управления тепловыми сетями.....	376
Чныбаева Д. М., Цыба Ю. А.	
Wireless hart технологиясы бойынша магистральдық құбырдағы газдың ағуын бақылау	389
Шоланов К. С., Асаинов Г. Ж., Жакипов Н. Б., Буранбаев Е. А., Марковский В. П.	
Исследование и разработка автоматизированной системы генерирования и аккумуляирования электроэнергии парусной ветровой электростанции.....	404

Авторлар туралы ақпарат

Сведения об авторах

Information about the authors.....

Авторларға арналған ережелер

Правила для авторов

Rules for authors.....

Жарияланым этикасы

Публикационная этика

Publication ethics.....

<https://doi.org/10.48081/RMYJ8613>

**Н. Е. Алдиарбек¹, Б. Онгар², *Ж. С. Дүйсенбек³,
М. А. Маханова⁴, А. Т. Егзекова⁵**

^{1,2}Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу техникалық университеті,
Қазақстан Республикасы, Алматы қ.

³Ғ. Даукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті,
Қазақстан Республикасы, Алматы қ.

⁴С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық университеті,
Қазақстан Республикасы, Астана қ.

⁵М. Тынышпаев атындағы АЛТ университеті,
Қазақстан Республикасы, Алматы қ.

¹ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-2671-7943>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8333-8343>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7844-4240>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-7090-869X>

⁵ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7756-765X>

*e-mail: zhaniko.adina@mail.ru

ЖЕЛ ҚОНДЫРҒЫСЫНЫҢ ЖАҒДАЙЫН БАҚЫЛАУ ҮШІН ЖЕЛ ҚОНДЫРҒЫСЫ ЭМУЛЯТОРЫН МОДЕЛЬДЕУ ЖӘНЕ ӘЗІРЛЕУ

Мақалада нақты уақыт режимінде оның техникалық жағдайын бақылау үшін жел турбинасының (ЖЭҚ) бағдарламалық эмуляторын модельдеу және әзірлеу әдістері талқыланады. Энергиямен жабдықтау құрылымында жел энергиясының үлесін арттыру жабдықтың сенімді және үздіксіз жұмысын қамтамасыз ету үшін интеллектуалды бақылау және диагностикалық құралдарды енгізуді талап етеді. Зерттеу барысында негізгі жұмыс параметрлерінің динамикасын көрсететін математикалық моделі әзірленді: жел жылдамдығының өзгеруі, ротордың айналуы, генератор жүктемесі, шығыс қуаты, сонымен қатар мүмкін болатын ақауларды ескереді. Осы үлгінің негізінде жұмыс режимдерінің кең ауқымын - қалыпты жұмыстан төтенше жағдайларға дейін жаңғырта алатын бағдарламалық эмулятор жасалды. Эмулятор жабдықтың жағдайын бағалауға, автоматты басқару жүйелерін сынауға, диагностикалық

алгоритмдерге және техникалық қызмет көрсетуді болжауға арналған. Оны білім беру мақсатында жел энергетикасы саласындағы мамандарды дайындау үшін де пайдалануға болады. Ұсынылған нәтижелер автоматтандыру деңгейін арттыру, операциялық тәуекелдерді азайту және жел турбинасына техникалық қызмет көрсетуді оңтайландыру бойынша әзірленген тәсілдің тиімділігін растайды. Мұндай эмуляторларды дамыту жаңартылатын энергия жүйелерін және енгізілген интеллектуалды басқару платформаларын цифрландырудың перспективалық бағыты болып табылады.

Кілтті сөздер: жел турбинасы, эмулятор, модельдеу, техникалық жағдайды бақылау, диагностика, жел энергетикасы.

Кіріспе

Қазіргі таңда жаңартылатын энергия көздеріне деген сұраныс жыл сайын артып келеді. Соның ішінде жел энергетикасы - экологиялық тұрғыдан таза, ұзақмерзімді және тиімді энергия көзі ретінде кеңінен қолданылып келеді. Жел электр станцияларының техникалық тиімділігі мен экономикалық рентабельділігі жел турбиналарының сенімділігіне және олардың жұмыс жағдайын нақты уақыт режимінде бақылау мүмкіндігіне тікелей байланысты.

Жел турбиналары – күрделі көп компонентті мехатрондық жүйелер, олардың ұзақмерзімді және қауіпсіз жұмысы үздіксіз мониторинг пен алдын ала диагностиканы қажет етеді. Алайда нақты қондырғылардың жұмысын толыққанды зерттеу және ақау жағдайларын модельдеу үшін оларды тәжірибелік жолмен сынау қымбатқа түседі әрі қауіпті болуы мүмкін. Осы мәселені шешу мақсатында жел турбинасының жұмысын модельдейтін және әртүрлі режимдерді имитациялай алатын эмуляторларды әзірлеу өзекті болып отыр.

Эмулятор – бұл нақты жүйенің физикалық және динамикалық қасиеттерін бейнелейтін, бағдарламалық немесе аппараттық деңгейде жүзеге асырылатын модель. Ол жел қондырғысының жұмысын нақты уақыт режимінде бақылауға, түрлі жағдайларда оның мінез-құлқын болжауға және басқару алгоритмдерін сынауға мүмкіндік береді.

Осы мақалада жел турбинасы үшін эмулятор жүйесін модельдеу және бағдарламалық тұрғыда жүзеге асыру жолдары қарастырылады. Зерттеудің басты мақсаты - жел энергетикалық жүйелерінің сенімділігін арттыруға және техникалық қызмет көрсету үдерісін оңтайландыруға мүмкіндік беретін тиімді диагностикалық құрал әзірлеу.

Материалдар мен әдістері

Бұл зерттеуде жел турбинасының жұмысын модельдеу және оның техникалық жағдайын бақылауға мүмкіндік беретін эмулятор құру үшін

кешенді әдіс қолданылды. Эмулятор нақты жел турбинасының физикалық және динамикалық сипаттамаларын ескеретін математикалық модельдерге негізделіп, бағдарламалық құрал арқылы жүзеге асырылды.

Математикалық модельдеу

Жел турбинасының жұмысын сипаттау үшін келесі негізгі модельдер қолданылды:

Аэродинамикалық модель – турбинаның қалақшаларына әсер ететін жел күшін есептеу үшін қолданылды. Бұл модель жел жылдамдығы мен қалақшаның бұрыштық параметрлеріне негізделді.

Жел турбинасының жұмыс принципі аэродинамикаға негізделген. Турбинаның аэродинамикалық шығыс қуаты келесі түрде берілген [1;2]

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_p \cdot A \cdot v^3 \quad (1)$$

мұндағы v - ауаның жылдамдығы;

C_p – қуат коэффициенті (теориялық максимум 0.593, Бец шегі);

ρ – ауаның тығыздығы (шамамен 1.225 кг/м³);

A – ротор қалақтары сыпыратын аудан.

Түрлендіру тиімділігі немесе C_p – қол жетімді жел энергиясының турбина білігінің механикалық энергиясына қатынасы. Бұл жел жылдамдығының қатынасы (λ) және қадам бұрышының (β) функциясы болып келеді.

$$C_p = f(\beta, \lambda) \quad (2)$$

Жел жылдамдығының қатынасы (λ) келесі түрде берілген:

$$\lambda = \frac{w \cdot R}{v} \quad (3)$$

мұндағы, w - ротордың бұрыштық жылдамдығы, рад/с.

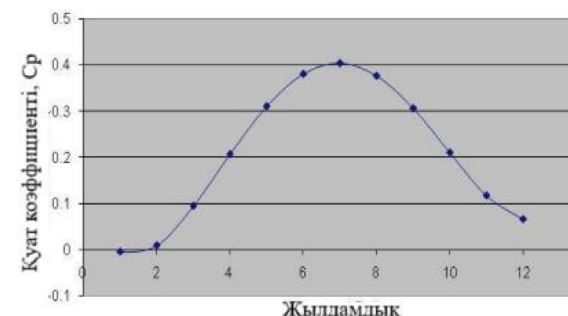
Қуат коэффициентінің сандық жуықтауы [3] арқылы берілген:

$$C_p(\lambda) = 0,22 \cdot \left(\frac{116}{\lambda i - 5} \right) \cdot e^{-\frac{12,5}{\lambda i}} \quad (4)$$

немесе

$$\frac{1}{\lambda i} = \frac{1}{\lambda} - \frac{0,03}{\beta^3 + 1} \quad (5)$$

Жел жылдамдығы мен қуат коэффициенті арасындағы тәуелділік график 1- суретте көрсетілген.



Сурет – 1–Қуат коэффициенті және жел жылдамдығына тәуелділігі

Жел жылдамдығының өзгеруіне байланысты ротордың айналу жиілігі мен генерацияланған қуат арасында айқын тәуелділік байқалды. Талдау жасап, келесідей нәтижені айтуға болады (1 – кесте):

1 Жел жылдамдығы артқан сайын қуат өндірісі де логарифмдік өсіммен көбейеді.

2 10 м/с жылдамдықтан кейін қуат сызықтық шектеуге жақындады (номинал шекке жетті);

3 Модель генератордың шамадан тыс жүктелуін болдырмай, қуатты шектеу функциясын дұрыс орындады.

1 – Кесте – График сипаттамасы

№	Жел жылдамдығы (м/с)	Ротор жиілігі (об/мин)	Қуат (Вт)
1	5	200	100
2	8	320	300
3	10	400	450
4	12	470	500

Айналу моменттің СТ моментінің коэффициенті арқылы есептеуге болады:

$$C_T = \frac{C_p}{\lambda} \quad (6)$$

Сонда айналудың моменті

$$T_{\text{айн}} - \frac{P}{\omega} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^3 \cdot C_T \cdot v^2 \quad (7)$$

Жел турбинасын эмуляциялау

Эмуляция - нақты жүйенің жұмыс істеу процесін компьютерлік модель немесе бағдарламалық жасақтама арқылы қайталап көрсету әдісі. Жел турбинасын эмуляциялау кезінде біз жел жылдамдығының өзгеруіне, турбинаның реакциясына, генерацияланған қуатқа, және басқа да көрсеткіштерге модельдік талдау жүргіземіз.

Жел турбинасын эмуляциялау – болашақ энергетикалық жобаларда тиімді шешімдер қабылдауға мүмкіндік беретін маңызды құрал. Бұл әдіс техникалық, экономикалық және экологиялық параметрлерді есептеуге жол ашады. Эмуляциялау арқылы алынған мәліметтер нақты жобалардың негізіне айналуы мүмкін [4].

Эмуляциялау әдістері

Жел турбинасын эмуляциялауға арналған бірнеше танымал бағдарламалар бар:

– MATLAB/Simulink: Жел турбинасының математикалық моделін құруға және динамикалық процесстерді визуализациялауға мүмкіндік береді.

– HOMER Energy: Жел, күн және басқа да жаңартылатын көздерді біріктіріп талдауға арналған.

– OpenModelica / Dymola: Физикалық негізделген модельдеу.

– Python (NumPy, SciPy, Matplotlib): Еркін бағдарламалау арқылы өз моделінді құру мүмкіндігі.

Жел турбинасы эмуляторы MATLAB/Simulink ортасында модельденді. Бұл платформа динамикалық жүйелерді модельдеу және визуализациялау үшін кеңінен қолданылады. Simulink блок-схемалары көмегімен жүйенің аэродинамикалық, механикалық және электрлік бөліктері біріктіріліп, біртұтас симуляциялық модель құрылды.

Модельдеу MATLAB/Simulink ортасында орындалды. Жел қондырғысы жүйесінің негізгі компоненттері:

- Айнымалы жел жылдамдығы генераторы;
- Турбина роторының моделі;
- Тұрақты ток қозғалтқышы (жел қозғалтқышын эмуляциялау үшін);
- Тахогенератор (жылдамдықты бақылау үшін);
- Қуат генераторы (электр жүктемесін модельдеу);
- PI-регулятор арқылы жылдамдықты бақылау.

2- кесте. Бастапқы параметрлер

10

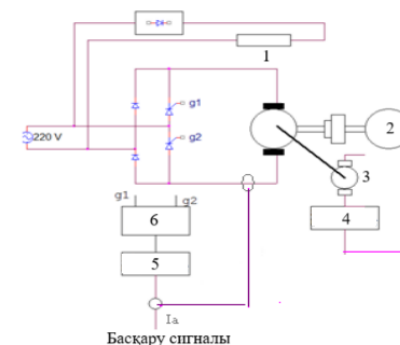
№	Параметрлер	Мәні
1	Жел жылдамдығы	5–12 м/с аралығында
2	Қалақ ұзындығы	1,2 м
3	Номинал қуат	500 Вт
4	Тұрақты ток моторы	220 В, 2.5 А

Қосымша түрде Python тілі қолданылып, модельдің сыртқы интерфейсін құру және алынған деректерді өңдеу жүзеге асырылды.

Нәтижелер және талқылау

Жел турбинасын эмуляциялау токтың басқаруындағы тұрақты ток қозғалтқышының жетегі арқылы жасалады [5;6]. Орнату кезінде 2,5 кВт, 1750 айн/мин тұрақты ток қозғалтқышы пайдаланылады. Анықтамалық ток (1-7) теңдеулер арқылы есептеледі.

Құрастырылған жел қондырғысы эмуляторы желдің түрлі жылдамдық режимдеріндегі жұмысты тиімді имитациялады. Эмуляция нәтижесінде жүйенің тұрақтылығы, жылдам жауап беруі, және қуатты шектеу қабілеті дәлелденді. Бұл эмулятор нақты жел турбиналарының жағдайын бақылау және оқыту, тестілеу, алгоритмдерді сынау сияқты міндеттерге тиімді пайдалануға жарамды (2 – сурет).



2 – сурет – Толық толқынды жартылай басқарылатын түзеткіш үшін басқару схемасы

2 – суретте толық толқынды жартылай басқарылатын түзеткіш арқылы тұрақты ток (DC) қозғалтқышын басқару схемасы көрсетілген. Бұл схема әдетте жел турбинасын эмуляциялау жүйелерінде жиі пайдаланылады, өйткені ол генератордың жылдамдығын реттеуге мүмкіндік береді.

Төменде осы сұлбаның барлық элементтерін және олардың өзара әрекетін толық түсіндірілген:

11

220 В айнымалы ток көзі – бұл желіден келетін айнымалы ток (AC) кернеуі. Ол түзеткіш арқылы тұрақты токқа (DC) айналып, қозғалтқышты қоректендіреді.

Толық толқынды жартылай басқарылатын түзеткіштер 4 тиристор (g1 және g2 арқылы басқарылатын) түзеткіш схемасы бар. Бұл схема айнымалы токты толық толқынды түрде түзетіп, сонымен бірге тиристорлардың басқару бұрышын өзгерту арқылы шығыс кернеуді реттеуге мүмкіндік береді.

Схемадағы 1 – тұрақты ток қозғалтқышы. Түзеткіштен шыққан тұрақты токпен қоректенеді. Сонымен қатар Валинда генератор (IG) және тахогенератор қосылған. Қозғалтқыштың айналу жиілігі өзгерген кезде, оған жалғанған генератор мен тахогенератор да соған сәйкес жұмыс істейді.

2 – Генератор. Бұл – жүктеме ретінде қызмет ететін генератор. Жел турбинасындағы нағыз генераторды эмуляциялайды.

3 – Тахогенератор. Қозғалтқыштың айналу жылдамдығын өлшейді. Тахогенератордың кернеуі жылдамдыққа пропорционалды.

4 – Жылдамдық бағалаушы блок. Тахогенератордан алынған сигналды өңдеп, нақты айналу жиілігін анықтайды. Бұл мән кері байланыс ретінде регуляторға беріледі.

5 – Пропорционалды-интегралды реттегіш. Реттегіш берілген жылдамдық мәні (Reference) пен өлшенген нақты жылдамдықты салыстырады. Айырмашылыққа (қателікке) сәйкес тиристорларды басқаруға арналған басқару сигналы қалыптастырады. Бұл – жабық циклды басқару жүйесі.

6 – Импульстік басқару схемасы. Регулятор реттегіштен келген басқару сигналына сәйкес тиристорларды іске қосатын импульс жасайды. Тиристордың ашылу бұрышын (α) өзгерте отырып, қозғалтқышқа берілетін кернеуді басқарады. Яғни, қозғалтқыш жылдамдығы да өзгертіледі.

Басқару сигналы. Бұл – қалаған жылдамдық мәні (мысалы, қолмен орнатылған). Қозғалтқыш осы мәнге сәйкес айналуы керек.

Жылдамдығы минимумнан жұмыстыққа дейінгі диапазондағы жел қондырғысы жел жылдамдығы жоғары болған сайын қуатты да көп өндіреді. Жел жылдамдығы $v \geq v_p$ кезінде, арнайы реттеуіш құрылғысы көмегімен автоматты түрде жел дөңгелегінің және өндірілетін қуаттың тұрақты айналу режимі орнатылады. Егер $v \geq v_{max}$ болса, жел қондырғысындағы желдің тегеуріні сындық болады және механикалық беріктік жағдайына байланысты ол өшеді [7].

Жел қондырғысынан туындайтын қуат, желдің дөңгелегінен үдетілетін қуаттан, пайдаланылған жел энергиясын пайдалыға айналдыру кезінде шығын бірлік мөлшерімен ерекшеленеді:

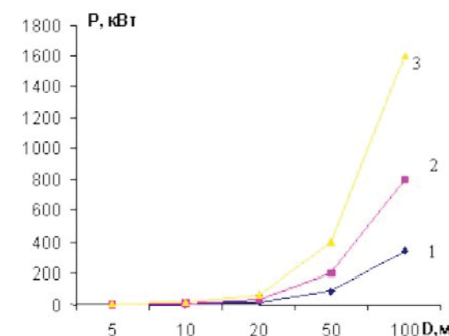
$$N_{B\Delta Y} = 4,81 \cdot 10^4 \cdot D^2 \cdot v^3 \cdot \xi \cdot \eta_n, \text{ кВт} \quad (8)$$

немесе жел қондырғысының жел қамтитын бетінің аудан бірлігіне

$$N_{B\Delta Y} = 0,615 \cdot 10^{-3} \cdot v^3 \cdot \xi \cdot \eta_n, \text{ кВт} / \text{м}^2 \quad (9)$$

мұндағы, η_n – жел дөңгелек білігінен жұмыс машинасына дейін қуатты беру кезіндегі шығынды есепке алатын ЖЭҚ пайдалы әсер коэффициенті.

Ауа қысымының және температурасының қалыпты жағдайлары үшін, желдің есептік жылдамдығына және жел доңғалағының диаметріне байланысты ЖЭҚ өндіре алатын қуаты 3 - суретте көрсетілген.



3 – Сурет ЖЭҚ қуатының жел жылдамдығының жел дөңгелегінің диаметріне тәуелділігі:

1 – қисық – $V = 5$ м/с; 2 – қисық – $V = 8$ м/с; 3 – қисық – $V = 10$ м/с.

Алынған график бойынша диаметр артқан сайын қуат экспоненциалды өседі. Диаметр 5 м-ден 50 м-ге дейін артқанда қуат жүздеген есе өседі. Бұл қалақ ауданының үлкеюі арқылы жел энергиясын көбірек ұстауға болатынын көрсетеді.

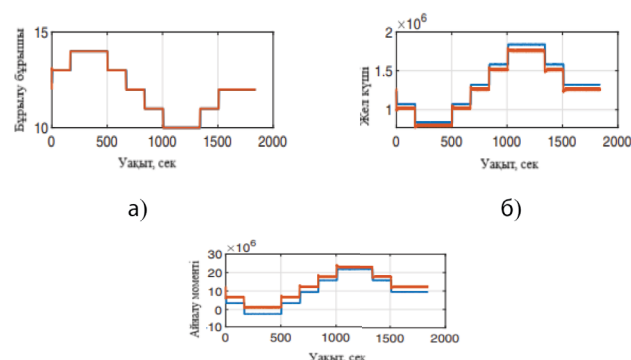
Ал жел жылдамдығы артқан сайын қуат тезірек өседі. Қисықтар арасындағы айырмашылық өте үлкен болады:

- 5 м/с (Қисық 1): $P \approx 200$ кВт
- 8 м/с (Қисық 2): $P \approx 800$ кВт
- 10 м/с (Қисық 3): $P \approx 1600$ кВт

Бұл жел жылдамдығының қуатқа әсері өте күшті екенін дәлелдейді (өйткені V3) [8].

Жел дөңгелегінің диаметрі мен жел жылдамдығы артқан сайын қуат айтарлықтай өседі. 10 м/с жылдамдық пен 50 м диаметр кезінде ЖЭҚ қуаты максималды мәнге жетеді (1600 кВт – шамамен 1.6 МВт). Сондықтан жел электр станцияларын жобалағанда үлкен диаметрлі қалақтар мен жоғары жел жылдамдығы бар аймақтар таңдалады.

Жел турбинасы – атмосфералық жел ағынынан механикалық және электрлік қуат өндіретін күрделі динамикалық жүйе. Оның жұмысы уақытқа, жел жылдамдығына, қалақ бұрышына және басқа да параметрлерге тікелей байланысты. Бұл параметрлердің өзара байланысы жел турбинасының тиімділігі мен қауіпсіз жұмыс істеуін қамтамасыз етеді [9].



4-Сурет – Жел турбинасының жұмыс параметрлерінің уақыт бойынша өзгерісі

Бұл графиктер, модельдеу немесе эмуляция нәтижелерін көрсетеді. Өрқайсысын жеке қарастырасақ:

Сол жақ график (а) – турбина қалақтарының бұрылу бұрышы. Уақыт бойынша өзгеріп отырады (0–2000 сек). Бастапқыда 100-тан 150-қа дейін өсіп, кейін қайта азайып, 120 маңында тұрақтайды.

Қалақ бұрышы желдің жылдамдығы мен жүктеме жағдайына байланысты өзгертіліп отырады. Бұл бұрыш қуатты басқару және артық жүктемені болдырмау үшін қажет.

Ортаңғы график (б) – қалаққа әсер ететін жел күші (осқа перпендикуляр). Диапазон: шамамен 1×10^6 – 2×10^6 Н болады. Уақыт бойынша күшейіп, кейін қайта азаяды.

Тарту күші жел жылдамдығына, қалақ бұрышына және айалу жылдамдығына байланысты.

Астыңғы жақ график (в) – турбинаның білігіне әсер ететін айналдыру моменті. Диапазон: шамамен 5×10^6 – 25×10^6 Н·м болады.

Айналдыру моменті генераторға берілетін нақты механикалық қуат көзі. Бұл параметр – турбинаның қуат өндіру мүмкіндігін көрсететін негізгі көрсеткіші болады [10].

Үш график те бір-бірімен тығыз байланысты. Бұл белсенді басқару жүйесінің жұмыс істеп тұрғанын көрсетеді.

Қызыл және көк сызықтар, шамамен, теориялық және модельдік (немесе нақты) мәліметтерді салыстырып көрсетілген.

Жел турбинасының бұрылу бұрышы, тарту күші, және айалу моменті сияқты негізгі параметрлері уақыт бойынша динамикалық түрде өзгеріп тұрады. Бұл өзгерістер:

- Жел жағдайына;
- Басқару алгоритмдеріне,
- Механикалық жүктемелерге байланысты.

Оларды нақты бақылау және басқару – жел энергетикасының тұрақты әрі тиімді жұмысын қамтамасыз етудің негізі болып келеді.

Қорытынды

Мақалада жел қондырғысының жұмысын бақылауға арналған эмулятор жүйесін модельдеу және әзірлеу бойынша кешенді зерттеу жүргізілді. Модельдеу негізінде нақты жел турбинасының физикалық процестері мен параметрлері қарастырылып, оларды виртуалды ортада дәл бейнелейтін эмулятор құрылды. Бұл эмулятор жел жылдамдығының, ротордың айалу жиілігінің, тарту күші мен моменттің уақыт бойынша өзгеруін нақты бақылауға және басқаруға мүмкіндік береді.

Жел қондырғысының тиімді жұмыс істеуі үшін оның динамикалық жағдайын дәл бақылау және реттеу жүйесі аса маңызды. Осы мақсатта құрылған эмуляция жүйесі:

Өртүрлі жел жылдамдығы жағдайында турбинаның жұмысын имитациялай алды;

Басқару жүйелерін (регулятор, тиристорлы түрлендіргіш, тахогенератор) қосу арқылы жүйенің жауабы мен тұрақтылығы тексерілді;

Бұрылу бұрышының, тарту күшінің және айналдыру моментінің уақытпен өзгеруі сәтті модельденді;

Жел доңғалағы диаметрінің және жел жылдамдығының қуатқа әсері талданды.

Жүргізілген модельдеу және симуляциялық тәжірибелер көрсеткендей, жел қондырғысы эмуляторы нақты жұмыс жағдайларын дәл бейнелей алады және түрлі басқару алгоритмдерін сынауға ыңғайлы орта ұсынады.

Бұл жүйе болашақта:

Жел энергетикасы саласындағы автоматтандырылған басқару жүйелерін жобалау;

– Тәжірибелік және зертханалық зерттеулер жүргізу;

– Оқу мақсатында қолданылатын тренажер құру;

Жел қондырғыларының жұмыс сенімділігі мен тиімділігін арттыруда маңызды рөл атқара алады.

Жел қондырғысының жағдайын бақылауға арналған эмулятор жүйесін модельдеу – жел энергетикасы саласындағы сандық технологиялар мен интеллектуалды басқару жүйелерін дамытудағы маңызды қадам болып табылады. Бұл зерттеу нәтижелері – жел қондырғыларының жұмысын оңтайландыру, олардың сенімділігін арттыру және энергетикалық тиімділігін бақылау бағытында нақты қолданбалы шешімдер ұсынуға негіз бола алады.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

1 **Satpathy, A. S., Sahoo, N. C.** Development of Control Scheme for a Stand-Alone Wind System. *IEEE Students' Conference on Electrical, Electronics and Computer Science (SCEECS'12)*. Bhopal. 1–2 March 2012. – P. 1–4.

2 **Chang, L., Doraiswami, R., Boutot, T., Kojabadi, H.** Development of a Wind Turbine Simulator for Wind Energy Conversion Systems. *IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE'00)*. Halifax, NS, Canada. - May 2000. – P. 550–554.

3 **Nye, J. M., Bat, J. G., Khan, M. A., Barendse, P.** Design and Implementation of a Variable Speed Wind Turbine Emulator. *IEEE 20th International Conference on Electrical Machines (ICEM'12)*. Marseille. – September 2012. – P. 2060–2065.

4 **Лукутин, Б. В., Муравлев, И. О., Плотников, И. А.** Системы электроснабжения с ветровыми и солнечными электростанциями: учебное пособие. //–Томск: Изд-во Томского Политехнического университета. – 2015. – 128 с.

5 **Voltolini, H., Granza, M. H., Ivanqui, J., Carlson, R.** Modeling and Simulation of the Wind Turbine Emulator Using Induction Motor Driven by Torque Control Inverter. *10th IEEE/IAS Conference on International Industry Applications (INDUSCON'12)*. Fortaleza. 5–7 November 2012. –P. 1 – 6.

6 **Arifujjaman, M., Iqbal, M. T., Quaicoe, J. E.** Maximum Power Extraction from a Small Wind Turbine Emulator Using a DC-DC Converter Controlled by a Microcontroller. *IEEE 4th International Conference on Electrical and Computer Engineering (ICECE'06)*. Dhaka. 19–21 December 2006. –P.213–216.

7 **Шингисов, Б. Т.** Обоснование кинематических и конструктивных параметров электропривода генератора ветроустановки.// Дисс. на соиск. уч.степ. PhD. – Алматы, 2015. – 135 с.

8 **Бастрон, А. В.** и др. Ветроэнергетика Красноярского края /–Красноярск :Красноярский гос. аграрный университет, 2015. – 252 с.

9 **Мартьянов, А. С.** Исследование алгоритмов управления и разработка контроллера ветроэнергетической установки с вертикальной осью вращения.// Дисс.на соиск.уч.степ.канд.техн.наук. – Челябинск, 2016. – 174 с.

10 **Himani, Dahiya, R.** Design and Development of Wind Turbine Emulator to Operate with 1.6 kW Induction Generator. *Advanced Energy: An International Journal (AEIJ)*. – October 2014.– Vol. 1. № 4.

REFERENCES

1 **Satpathy, A. S., Sahoo, N. C.** Development of Control Scheme for a Stand-Alone Wind System. *IEEE Students' Conference on Electrical, Electronics and Computer Science (SCEECS'12)*. Bhopal. 1–2 March 2012. – P. 1–4.

2 **Chang, L., Doraiswami, R., Boutot, T., Kojabadi, H.** Development of a Wind Turbine Simulator for Wind Energy Conversion Systems. *IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE'00)*. Halifax, NS, Canada. – May 2000. – P. 550–554.

3 **Nye, J. M., Bat, J. G., Khan, M. A., Barendse, P.** Design and Implementation of a Variable Speed Wind Turbine Emulator. *IEEE 20th International Conference on Electrical Machines (ICEM'12)*. Marseille.- September 2012. – P. 2060–2065.

4 **Lukutin, B. V., Muravlev, I. O., Plotnikov, I. A.** Sistemy elektrosnabzheniya s vetrovymi i solnechnymi elektrostantsiyami: uchebnoe posobie [Power supply systems with wind and solar power plants: a textbook]. Tomsk: Izd-vo Tomskogo Politehnicheskogo Universiteta.. – 2015. – P. 128.

5 **Voltolini, H., Granza, M. H., Ivanqui, J., Carlson, R.** Modeling and Simulation of the Wind Turbine Emulator Using Induction Motor Driven by Torque Control Inverter. *10th IEEE/IAS Conference on International Industry Applications (INDUSCON'12)*. Fortaleza. 5–7 November 2012. –P. 1–6.

6 **Arifujjaman, M., Iqbal, M. T., Quaicoe, J. E.** Maximum Power Extraction from a Small Wind Turbine Emulator Using a DC-DC Converter Controlled by a Microcontroller. *IEEE 4th International Conference on Electrical and Computer Engineering (ICECE'06)*. Dhaka. 19–21 December 2006. – P. 213–216.

7 **Shingisov, B. T.** Obosnovanie kinematcheskikh i konstruktivnykh parametrov elektropivoda generatora vetroustanovki [Substantiation of kinematic and structural parameters of the electric drive of a wind turbine generator]. PhD diss. Almaty, 2015. – P.135 .

8 **Bastron, A. V., i dr.** Vetrogeneratsiya Krasnoyarskogo kraya [Wind energy industry of the Krasnoyarsk Territory]. Krasnoyarsk: Krasnoyarskii Gosudarstvennyi Agrarnyi Universitet, – 2015.

9 Martyanov, A. S. Issledovanie algoritmov upravleniya i razrabotka kontrolyera vetroenergeticheskoi ustanovki s vertikal'noi os'yu vrashcheniya [Investigation of control algorithms and development of a controller for a vertical-axis wind power plant]. Cand. tech. sci. diss. Chelyabinsk, 2016. – P.174.

10 Himani, Dahiya, R. Design and Development of Wind Turbine Emulator to Operate with 1.6 kW Induction Generator. *Advanced Energy: An International Journal (AEIJ)*. – October 2014. – Vol. 1 № 4.

22.07.25 ж. баспаға түсті.

25.07.25 ж. түзетулерімен түсті.

05.09.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

*N. E. Aldiarbek¹, B. Ongar², *Zh. S. Duissenbek³, M. A. Makhanova⁴,*

A. T. Egzekova⁵

^{1,2}Kazakh National Research Technical University named after K. I. Satbaeva, Republic of Kazakhstan, Almaty

³Energo University after Gumarbek Daukeev, Republic of Kazakhstan, Almaty

⁴Kazakh Agrotechnical University named after S. Seifullin, Republic of Kazakhstan, Astana

⁵ALT University named after M. Tynyshpayev, Republic of Kazakhstan, Almaty.

Received 22.07.25

Received in revised form 25.07.25

Accepted for publication 05.09.25

MODELING AND DEVELOPMENT OF A WIND POWER PLANT EMULATOR FOR WIND POWER PLANT CONDITION MONITORING

The article discusses the methods of modeling and developing a software emulator of a wind power plant (wind turbine) for monitoring its technical condition in real time. Increasing the share of wind energy in the energy supply structure requires the introduction of intelligent monitoring and diagnostic tools that ensure reliable and uninterrupted operation of equipment. In the course of the research, a mathematical wind turbine model was developed that reflects the dynamics of the main operating parameters: changes in wind speed, rotor rotation, generator load, output power, and also takes into account possible malfunctions. Based on this model, a software emulator has been created capable of reproducing a wide range of operating modes — from normal operation to emergency situations. The

emulator is designed to assess the condition of equipment, test automatic control systems, diagnostic algorithms, and predict maintenance. It can also be used for educational purposes to train specialists in the field of wind energy. The presented results confirm the effectiveness of the developed approach to increase the level of automation, reduce operational risks and optimize wind turbine maintenance. The development of such emulators represents a promising direction in the digitalization of renewable energy systems and embedded intelligent control platforms.

Key words. wind turbine, emulator, simulation, technical condition monitoring, diagnostics, wind energy.

*Н. Е. Алдиарбек¹, Б. Онгар², * Ж. С. Дүйсенбек³,*

М. А. Маханова⁴, А. Т. Егзекова⁵

^{1,2}Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева, Республика Казахстан, г. Алматы

³Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева, Республика Казахстан, г. Алматы

⁴Казахский агротехнический университет имени С. Сейфуллина, Республика Казахстан, г. Астана

⁵университет АЛТ имени М. Тынышпаева, Республика Казахстан, г. Алматы.

Поступило в редакцию 22.07.25

Поступило с исправлениями 25.07.25

Принято в печать 05.09.25

МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ЭМУЛЯТОРА ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ЕЕ СОСТОЯНИЯ

В статье рассматриваются методы моделирования и разработки программного эмулятора ветроэнергетической установки (ВЭУ) для мониторинга её технического состояния в режиме реального времени. Повышение доли ветровой энергии в структуре энергоснабжения требует внедрения интеллектуальных средств контроля и диагностики, обеспечивающих надежную и бесперебойную работу оборудования. В ходе исследования разработана математическая модель ВЭУ, отражающая динамику основных рабочих параметров: изменение скорости ветра, вращения ротора, нагрузки генератора, выходной мощности, а также учитывающая возможные неисправности. На основе данной модели создан программный эмулятор, способный

воспроизводит широкий спектр эксплуатационных режимов – от нормального функционирования до аварийных ситуаций. Эмулятор предназначен для оценки состояния оборудования, тестирования систем автоматического управления, алгоритмов диагностики и прогнозирования технического обслуживания. Также он может быть использован в образовательных целях для подготовки специалистов в области ветроэнергетики. Представленные результаты подтверждают эффективность разработанного подхода для повышения уровня автоматизации, снижения эксплуатационных рисков и оптимизации технического обслуживания ВЭУ. Разработка подобного рода эмуляторов представляет собой перспективное направление в цифровизации систем возобновляемой энергии и встраиваемых интеллектуальных платформ управления.

Ключевые слова: ветряная турбина, эмулятор, моделирование, мониторинг технического состояния, диагностика, ветроэнергетика.

МРНТИ 44.31.35

<https://doi.org/10.48081/XTUY2934>

***А. Ж. Амренова¹, А. М. Достияров², А. К. Яманбекова³,
Ж. К. Мусаева⁴**

^{1,2,3,4}Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека

Даукеева, Республика Казахстан, г. Алматы

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8295-7153>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6559-8598>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9670-5288>

⁴ORCID <https://orcid.org/0000-0003-4371-6159>

*e-mail: a.amrenova@au.es.kz

ИССЛЕДОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ И ХАРАКТЕРИСТИК ГОРЕЛОК ВОДОГРЕЙНЫХ КОТЛОВ МАЛОЙ И СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ

В данной статье рассматривается разработка горелочного устройства, предназначенного для использования в составе водогрейного котлоагрегата. Особое внимание уделено обеспечению экологической эффективности при сжигании топлива, в частности - снижению уровня выбросов вредных веществ в атмосферу. Конструктивные и технологические решения направлены на достижение высокого качества сгорания, соответствующего современным требованиям экологической и промышленной безопасности. В статье проведены как теоретические, так и экспериментальные исследования процессов горения, анализ эффективности различных конструктивных решений и режимов работы горелочного устройства. Компактность и малый вес микрофакельных горелок обуславливают их высокую мобильность, а также упрощают процесс установки в оборудование различного назначения. Эти характеристики не только повышают их мобильность, но и значительно упрощают интеграцию подобных устройств в теплотехническое оборудование различного назначения. Такие горелочные устройства обладают возможностью точной настройки и контроля ключевых параметров процесса сгорания – включая температуру, скорость горения и расход топлива. Это делает их особенно эффективными для применения в технологических

установках, где необходима высокая степень точности, стабильности теплового режима и минимальные отклонения от заданных характеристик.

Ключевые слова: Горелочные устройства, водогрейные котлы, малая мощность котлов, энергоэффективность, технические характеристики горелок, газовые горелки.

Введение

В условиях современных требований к энергетической эффективности и экологической безопасности вопросы разработки и совершенствования теплотехнического оборудования приобретают особую актуальность. Казахстан, обладая значительными запасами углеводородного сырья и развивающейся энергетической инфраструктурой, сталкивается с необходимостью внедрения технологий, способствующих снижению вредных выбросов в атмосферу. Это обусловлено как экологическими требованиями, так и обязательствами страны по международным соглашениям в области охраны окружающей среды.

Материалы и методы

Водогрейные котлоагрегаты, являясь важной составляющей системы теплоснабжения, играют ключевую роль в обеспечении населения и промышленных предприятий тепловой энергией. Однако их эксплуатация сопровождается выбросами различных вредных веществ, таких как оксиды азота (NOx), угарный газ (CO), сажа и другие. В этом контексте разработка горелочных устройств, способных существенно снизить уровень вредных выбросов, становится одной из приоритетных задач.

Котлы водогрейного типа с невысокой мощностью находят широкое применение в системах автономного теплоснабжения на объектах различного промышленного профиля. Достаточно остро стоит задача разработки эффективных отечественных малотоксичных горелочных устройств для котлов малой мощности. Характерным свойством воспламенения и сгорания топлива в таких котлах является его протекание в стесненных условиях из-за малых размеров камер сгорания и жаровых труб. Эти процессы существенно отличаются от процессов в открытых камерах сгорания энергетических котлов большой мощности и еще недостаточно изучены [1]. В современных условиях повышения требования по вопросам экологического и экономического плана становится актуальной эксплуатация высокоэкономичных водогрейных котлов [2].

Основной функцией горелочного устройства является преобразование химической энергии жидкого или газообразного топлива в тепловую энергию, необходимую для поддержания рабочего процесса. Основная задача

горелочного устройства заключается не только в полном сжигании топлива, но и в формировании газозооушного или капельного факела, параметры которого соответствуют требованиям конкретного технологического процесса, что способствует снижению тепловых потерь и уменьшению выбросов вредных веществ [3].

Основные условия, которые обеспечивают максимальную эффективность сгорания топлива:

- Высокий уровень надёжности и безопасности работы достигается за счёт локализации тепловыделения внутри горелки, минимального поступления продуктов сгорания из топки к её выходу для воспламенения топливозооушной смеси, а также за счёт эффективного охлаждения горелки потоком воздуха и газа, предотвращающим её перегрев;

- стабильное зажигание при воспламенении достигается за счёт стабилизации фронта горения в широком диапазоне теплопроизводительности горелки;

- Горелочное устройство отличается конструктивной простотой, что упрощает процессы его изготовления, технического обслуживания, инспекции, ремонта, а также позволяет реализовать автоматизацию работы по упрощённым схемам;

- универсальность – возможность использования в установках различных типов в качестве комбинированного устройства, обеспечивающего полное сжигание газа и любого другого вида топлива (основного резервного) при удовлетворении технологических требований установок;

- минимальное сопротивление по воздушному тракту;

- обеспечение в случае надобности в камере горения необходимой атмосферы – как восстановительной, так и окислительной – в зависимости от условий эксплуатации;

- при режиме сжигания газа сохранность горелочного оборудования для других (резервных) видов топлива;

- обеспечение тихой работы при любых уровнях нагрузки без возникновения вибраций в арматуре и конструктивных элементах установки;

- обеспечение требуемой длины и необходимого угла раскрытия факела пламени в камере горения или топке [3].

Применяются большое количество горелочных устройств разных конструкций. Для классификации горелочных устройств используются различные признаки, несколько из которых приведены в таблице 1.1 [4; 5; 6; 7]. Предложенная классификация не является полной, поскольку существует множество горелок с уникальными техническими решениями, такими как горелки типа FIR (Forced Internal Recirculation) с принудительной внутренней

рециркуляцией, которые встречаются лишь в нескольких вариантах и не могут быть отнесены к большинству классификационных категорий [8].

Таблица 1.1 – Классификация горелочных устройств

По виду используемого топлива	– Газовые – Жидкотопливные – Пылеугольные – Комбинированные
По типу смешения воздуха и топлива	– Диффузионные горелки – Горелки с предварительным перемешиванием – Комбинированные
По типу движущей силы	– с принудительной тягой – с уравновешенной тягой - инжекционные
По наличию закрутки	– вихревые – прямоточные – прямоточно-вихревые
По типу используемого закручивающего устройства	– аксиальные – тангенциальные – улиточные – аксиально-тангенциальные (диагональные) – комбинированные
По наличию конструктивных особенностей (другое)	– Традиционные – Муфельные – Ротационные – Канальные – и т.д.
По уровню эмиссии NOx	– традиционные – Low NOx – Ultra Low NOx
По типу снижения NOx	– с использованием топливной стадийности – с использованием воздушной стадийности – с рециркуляцией – комбинированные – и т.д.
По комплектности горелки	– Моноблочные (включающие всё необходимое оборудование, предназначены для работы при малой мощности) – Блочные (не оснащённые специальными устройствами для подачи воздуха и топлива, обычно предназначены для работы на более высокой мощности)

Существует два основных типа газовых горелок, которые различаются по методу формирования смеси топлива и воздуха, необходимой для сгорания.

Каждый тип имеет свои преимущества и недостатки с точки зрения эффективности, надежности, эксплуатации и экологичности.

Атмосферные горелки (инжекционные) - используют принцип конвекции для подачи воздуха и топлива в камеру сгорания. Воздух поступает естественным образом из окружающей среды благодаря разности давлений. Топливо также поступает под действием гравитации. Атмосферные горелки просты в конструкции и обслуживании. Но их эффективность может быть ниже по сравнению с другими типами горелок из-за ограничений в контроле подачи топлива и воздуха; могут требовать более частого обслуживания для поддержания оптимальной работы; ограниченные возможности по регулированию процесса сгорания.

Наддувные (вентиляционные) устройства: Эти горелки используют вентилятор для принудительной подачи воздуха в камеру сгорания и вытяжки продуктов сгорания. Это обеспечивает более точный контроль над процессом сгорания и повышает эффективность работы котла. Принудительная тяга также позволяет более эффективно сжигать различные виды топлива, включая сжиженный газ, мазут и др. Недостатками данной горелки является необходимость в регулярном обслуживании и проверке состояния вентилятора, более высокая стоимость приобретения и установки.

Низконапорные горелки: Эти горелки характеризуются низким давлением подачи топлива и воздуха. Они обычно используются в системах с низкими требованиями к мощности и предназначены для работы с жидкими топливами, такими как дизельное топливо или сжиженный газ. Низконапорные горелки могут быть компактными и экономичными, что делает их подходящими для применения в домашних и малых коммерческих котельных. Недостатками данной горелки является ограниченные возможности в работе с высокими нагрузками, могут потребовать специального обслуживания и настройки.

Для обеспечения минимизации выбросов необходимо усовершенствовать процессы горения и повышать производительность теплоиспользующих установок [9].

Результаты и обсуждение

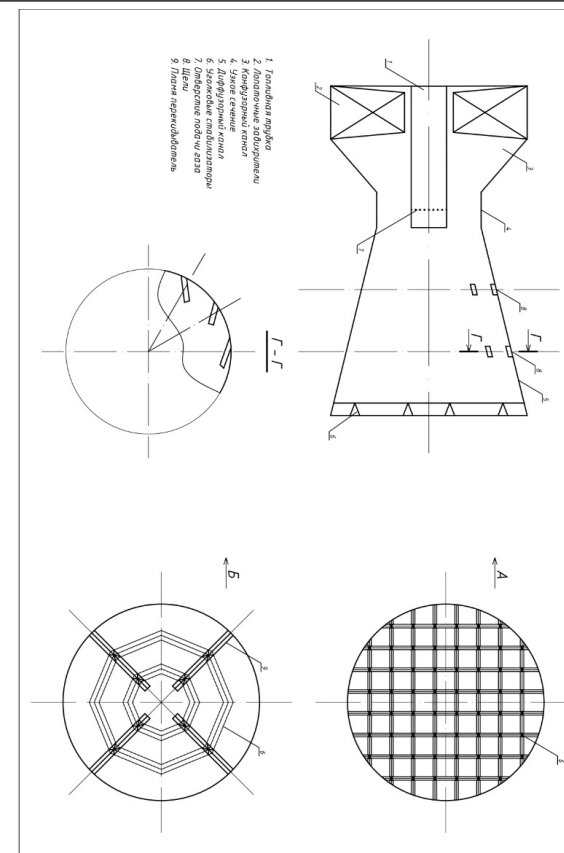
Анализируя состояние вопроса теплоснабжения и загрязнения вредных выбросов котельных, часто приходим к решению о замене устаревших водогрейных котлов современными аналогами и установки малотоксичной микрофакельной горелки. Для лучшей организации микрофакельного сжигания необходимо интенсификация процессов горения [10].

Микрофакельные горелки обеспечивают высокую эффективность сгорания топлива благодаря своей конструкции, что позволяет использовать топливо с максимальной эффективностью. Конструктивные особенности микрофакельных горелок, такие как небольшие размеры и малый вес, делают

их удобными для переноса и позволяют использовать в широком спектре в различных устройствах и систем. Они обладают возможностью точного контроля параметров сгорания, таких как температура, скорость горения и расход топлива, что делает их идеальными для приложений, требующих высокой точности и стабильности процесса.

Разрабатываемая микрофакельная горелка планируется для установки на водогрейных котлах. Микрофакельная горелка представляет собой устройство, включающее в себя топливную трубку с отверстиями для подачи газа, конфузорный канал с установленными на нём входными лопаточными завихрителями воздуха, зону узкого сечения и диффузорный канал, в котором осуществляется смешивание топлива с воздухом, отличается тем, что установление выходных уголкового стабилизаторов, могут быть выполнены двумя способами:

- 1) в виде решетки, изготовленных из уголков, из жаростойкой стали;
- 2) в виде многогранников, расположенных коаксиально друг другу, также изготовленных из жаростойкой стали, а также в диффузорном канале выполнены щели в два ряда, создающие противоположное вращения вторичного воздуха к топливовоздушной смеси, обеспечивающие более равномерный поток на входе в стабилизатор и микрофакельное сжигание на уголкового стабилизаторах.



1 – Топливная трубка; 2 – Лопаточные завихрители; 3- Конфузорный канал; 4 – Узкое сечение; 5 – Диффузорный канал; 6 – Уголкового стабилизаторы; 7 – Отверстие подачи газа; 8 – Щели; 9 – Пламя перекидыватель.

Рисунок 1 – Схема микрофакельной горелки для водогрейного котла

На Рисунке 1 показана продольный разрез горелки, на фигуре А вид решетки, изготовленных из уголков, на фигуре Б вид многогранников, расположенных коаксиально друг другу и на фигуре Г-Г вид сверху на щели, где:

- 1 – топливная трубка;
- 2 – входные лопаточные завихрители;
- 3 – конфузорный канал;

- 4 – узкое сечение;
- 5 – диффузорный канал;
- 6 – уголки стабилизаторы;
- 7 – отверстия для подачи газа;
- 8 – щели
- 9 – пламя перекидыватель.

Горелочное устройство для сжигания газообразного топлива включает следующие узлы и зоны: топливную трубку 1 с отверстиями для подачи газа 7, конфузорный канал 3, на котором установлены входные лопаточные завихрители 2, узкое сечение 4, диффузорный канал 5, где установлены щели 8 для подачи вторичного воздуха и на выходе установлены уголки стабилизаторы 6 в виде решетки, также на стабилизаторах закреплены четыре пламя перекидывателя из уголков 9.

Горелочное устройство для сжигания газообразного топлива в предполагаемом изобретении работает следующим образом: воздух, необходимый для подготовки топливовоздушной смеси поступает потоком в горелку через входной лопаточный завихритель 2. Далее через отверстия для подачи газа 7 топливной трубки 1 осуществляется впрыск газообразного топлива в узком сечении 4 конфузорно-диффузорного канала (3-4-5), где воздух и топливо пересекаются перпендикулярно и затем перемешиваются. Дополнительно в диффузорной части канала 5 имеются щели 8, позволяющие вторичному воздуху входить тангенциально и образовывать завихренный поток в сечениях противоположно закручивания входными лопатками. В результате данного процесса формируется равномерно распределённая топливовоздушная смесь, стабилизация которой осуществляется на выходных решетках, выполненных из уголковых элементов (или многогранных конструкций на их основе) и поддерживается в форме микрофакелов с помощью угловых стабилизаторов 6, расположенных на выходе. Дополнительно в конструкции предусмотрены четыре пламя перекидывателя 9, изготовленные из уголковых элементов, которые установлены на угловых стабилизаторах 6 с целью обеспечения полного сгорания топливовоздушной смеси.

Выводы

Таким образом, изобретение может обеспечивать эффективное и устойчивое сжигание природного газа в малых водогрейных котлах с минимальными выбросами.

Поставленные задачи в объекте изобретения газовой горелки включают в себя новые признаки, которые не были выявлены в выше анализированных аналогах.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 **Roslyakov, P. V., Proskurin, Y. V., Khokhlov, D. A.** Development of combined low-emissions burner devices for low-power boilers. Therm. Eng. 64, 574–584 (2017). <https://doi.org/10.1134/S0040601517080092>
- 2 **Орумбаев, Р. К.** «Исследование, разработка и организация серийного производства водогрейных котлов нового поколения»: дисс. д.т.н. – Алматы, 2002. – 253 с.
- 3 **Ведрученко, В. Р., Жданов, Н. В., Жданова, Е. Е., Лазарев, Е. С.** Особенности выбора горелочных устройств для котлоагрегатов малой производительности. Омский научный ВЕСТНИК №3 (83) 2009.
- 4 **Ахмедов, Р. Б.** Дутьевые газогорелочные устройства. – М. : Недра, 1977.
- 5 ОСТ 108.836.05-82. Горелки газомазутные и амбразуры стационарных паровых котлов. Типы, основные параметры и технические требования. Конструкция и размеры. Методы расчета и проектирования: Нормативно-технический материал. – М. : 1984.
- 6 Горелки для отопительных и промышленных установок / Под ред. С.Е. Беликова. – М.: ООО «Квартика-М», 2003.
- 7 **Роддатис, К. Ф., Полтарецкий, А. Н.** Справочник по котельным установкам малой производительности / Под ред. К.Ф. Роддатиса – М.: Энергоатомиздат, 1989.
- 8 **Проскурин, Ю. В.** «Исследование и разработка малоэмиссионного комбинированного горелочного устройства для жаротрубных котлов» : дисс. к.т.н. – Москва, 2019.
- 9 **Бельская, Т. И.** О выборе горелочных устройств для котлоагрегатов малой мощности при реконструкции муниципальных котельных и других топливосжигающих установок. Омский научный ВЕСТНИК №1, 2016.
- 10 **Сударев, А. В., Маев, В. А.** Камеры сгорания газотурбинных установок. Интенсификация горения. – Л. : Недра, 1990. – 274 с.

REFERENCES

- 1 **Roslyakov, P. V., Proskurin, Y. V., Khokhlov, D. A.** Development of combined low-emissions burner devices for low-power boilers. Therm. Eng. 64, 574–584 (2017). <https://doi.org/10.1134/S0040601517080092>
- 2 **Orumbaev, R. K.** Issledovanie, razrabotka i organizaciya seriinogo proizvodstva vodogreinih kotlov novogo pokoleniya: diss. d.t.n. [Research, development and organization of serial production of new generation hot water boilers: diss. d.t.s.] – Almaty, 2002. – 253 p.

3 **Vedruchenko, V. R., Jdanov, N. V., Jdanova, E. E., Lazarev, E. S.** Osobennosti vibora gorelochnih ustroistv dlya kotloagregatov maloi proizvoditelnosti [Features of choosing burner devices for low-capacity boiler units] – Omskii nauchnii VESTNIK №3(83) 2009.

4 **Ahmedov, R. B.** Dutevie gazogorelochnie ustroistva [Blower gas burner devices] – M. : Nedra, 1977.

5 OST 108.836.05-82. Gorelki gazomazutnie i ambrazuri stacionarnih parovih kotlov. Tipi, osnovnie parametri i tehnicheckie trebovaniya. Konstrukciya i razmeri. Metodi rascheta i proektirovaniya, Normativno_tehnicheckii material [Gas-oil burners and embrasures of stationary steam boilers. Types, main parameters and technical requirements. Design and dimensions. Calculation and design methods: Normative and technical material] – M. : 1984.

6 Gorelki dlya otopitelnih i promishlennih ustanovok / Pod red. S.E. Belikova. [Burners for heating and industrial installations / Edited by K.F. Roddatis] – M. : ООО «Kvartika-M», 2003.

7 **Roddatis, K. F., Poltareckii, A. N.** Spravochnik po kotelnim ustanovkam maloi proizvoditelnosti / Pod red. K.F. Roddatisa [Handbook of low-capacity boiler plants / Edited by K. F. Roddatisa] – M. : Energoatomizdat, 1989.

8 **Proskurin, Yu. V.** Issledovanie i razrabotka maloemissionnogo kombinirovannogo gorelochnogo ustroistva dlya jarotrubnih kotlov – diss. k.t.n. [Research and development of low-emission combined burner device for fire-tube boilers – diss. k.t.s.] – Moskva, 2019.

9 **Belskaya, T. I.** O vibore gorelochnih ustroistv dlya kotloagregatov maloi moschnosti pri rekonstrukcii municipalnih kotelnih i drugih toplivosjigayuschih ustanovok [On the selection of burner devices for low-power boiler units during the reconstruction of municipal boiler houses and other fuel-burning installations] - Omskii nauchnii VESTNIK №1, 2016.

10 **Sudarev, A. V., Maev, V. A.** Kamerni sgoraniya gazoturbinnih ustanovok. Intensifikaciya goreniya [Combustion chambers of gas turbine plants. Combustion intensification] – L.: Nedra, 1990. – 274 p.

Поступило в редакцию 13.05.25
Поступило с исправлениями 30.07.25
Принято в печать 05.09.25

*А. Ж. Амренова¹, А. М. Достияров², А. К. Яманбекова³,
Ж. К. Мусаева⁴

^{1,2,3,4}Ғұмарбек Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.

13.05.25 ж. баспаға түсті.

30.07.25 ж. түзетулерімен түсті.

05.09.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

ҚУАТЫ ТӨМЕН ЖӘНЕ ОРТАША СУ ЖЫЛЫТУ ҚАЗАНДЫҚТАРЫНЫҢ ҚЫЗДЫРҒЫШТАРЫНЫҢ КОНСТРУКЦИЯЛАРЫ МЕН СИПАТТАМАЛАРЫН ЗЕРТТЕУ

Бұл мақалада су жылытатын қазандық қондырғысының құрамында қолдануға арналған қыздырғыш құрылғының дамуы қарастырылады. Отынды жағу кезінде экологиялық тиімділікті қамтамасыз етуге, атап айтқанда - атмосфераға зиянды заттар шығарындыларының деңгейін төмендетуге ерекше назар аударылады. Сындарлы және технологиялық шешімдер экологиялық және өнеркәсіптік қауіпсіздіктің заманауи талаптарына сәйкес келетін жанудың жоғары сапасына қол жеткізуге бағытталған. Мақалада жану процестерінің теориялық және тәжірибелік зерттеулері, әртүрлі конструкторлық шешімдердің тиімділігін талдау және оттық құрылғысының жұмыс режимдері жүргізілді. Микрофакельді оттықтарының жинақылығы мен жеңіл салмағы олардың жоғары ұтқырлығын анықтайды, сонымен қатар әртүрлі мақсаттағы жабдыққа орнату процесін жеңілдетеді. Бұл сипаттамалар олардың ұтқырлығын арттырып қана қоймайды, сонымен қатар мұндай құрылғыларды әртүрлі мақсаттағы жылу жабдықтарына біріктіруді едәуір жеңілдетеді. Мұндай оттық құрылғылары жану процесінің негізгі параметрлерін - температураны, жану жылдамдығын және отын шығынын қоса, дәл реттеу және бақылау мүмкіндігіне ие. Бұл оларды дәлдіктің жоғары дәрежесі, жылу режимінің тұрақтылығы және берілген сипаттамалардан минималды ауытқулар қажет болатын технологиялық қондырғыларда қолдану үшін әсіресе тиімді етеді.

Кілтті сөздер: қыздырғыш құрылғылар, су жылыту қазандықтары, қазандықтардың төмен қуаты, энергия тиімділігі, қыздырғыштардың техникалық сипаттамалары, газ қыздырғыштары.

*A. Zh. Amrenova¹, A. M. Dostiyarov², A. K. Yamanbekova³,

Zh. K. Musayeva⁴

^{1,2,3,4}Non-profit joint-stock company «Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after Gumarbek Daukeyev»,

Republic of Kazakhstan, Almaty

Received 13.05.25

Received in revised form 30.07.25

Accepted for publication 05.09.25

STUDY OF DESIGN AND CHARACTERISTICS OF BURNERS OF LOW AND MEDIUM POWER WATER HEATING BOILERS

This article discusses the development of a burner device designed for use in a hot water boiler unit. Particular attention is paid to ensuring environmental efficiency during fuel combustion, in particular, reducing the level of harmful emissions into the atmosphere. Design and technological solutions are aimed at achieving high combustion quality that meets modern environmental and industrial safety requirements. The article contains both theoretical and experimental studies of combustion processes, analysis of the efficiency of various design solutions and operating modes of the burner device. The compactness and light weight of micro-torch burners determine their high mobility, and also simplify the installation process in equipment for various purposes. These characteristics not only increase their mobility, but also significantly simplify the integration of such devices into heat engineering equipment for various purposes. Such burner devices have the ability to precisely adjust and control key parameters of the combustion process - including temperature, combustion rate and fuel consumption. This makes them particularly effective for use in process installations where a high degree of accuracy, thermal stability and minimal deviations from specified characteristics are required.

Keywords: Burner devices, hot water boilers, low boiler power, energy efficiency, burner specifications, gas burners.

МРНТИ 44.29.37

<https://doi.org/10.48081/WDGW4665>

*А. Т. Балтин¹, Ж. Р. Исаева², А. Д. Бердалиев³

^{1,2}Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина», г. Астана, Республика Казахстан

³АО «Астана РЭК», г. Астана, Республика Казахстан

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4007-3987>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8146-8366>

³ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-5080-470X>

*e-mail: aliserbaltin9@gmail.com

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ И ВЛИЯНИЕ ВИЭ В ПОВЫШЕНИИ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ НАПРЯЖЕНИЕМ 20кВ

В данной статье выполнены исследования о использовании и влиянии ВИЭ в повышении энергоэффективности распределительных сетей напряжением 20кВ, и предложена практической реализации концепции «Smart Grid», которая является одним из способов для уменьшения потерь электроэнергии при ее производстве, транспортировании и потреблении, а также повышение качества энергоснабжения потребителей. В связи с этим, комплексное внедрение современного оборудования на базе новой концепции развития сетей электроснабжения, получившей название «Smart Grid», в полной мере соответствует общим представлениям о цифровой экономике страны в части цифровизации электроэнергетики, и позволяет решать проблемы повышения энергетической эффективности сети на новом технологическом уровне. Смысл концепции «Smart Grid», которая имеет отечественное название «умные сети», заключается в повышении эффективности сетей и качества электроэнергии, а также в снижении потерь энергии в сети. Предложена перспективная структурная схема распределительной сети напряжением 20 кВ дополнительно включающая децентрализованные источники возобновляемой энергии в виде ВЭС или солнечной электростанции, систему накопления энергии (СНЭ) и зарядные станции электротранспорта. В статье представлена структурная схема электроснабжения сетевой нагрузки, имеющая защиту от

взаимного влияния и блочная схема подключения ветрогенератора к распределительной сети.

Ключевые слова: сети 20кВ, умные сети, ВИЭ, подстанция, повышение энергоэффективности.

Введение

Ожидаемым результатом в практической реализации концепции «Smart Grid» является значительное общее уменьшение потерь электроэнергии при ее производстве, транспортировании и потреблении, а также повышение качества энергоснабжения потребителей [1]. Другими словами, повышение эффективности распределительных сетей является одним из результатов, достигаемых в процессе практической реализации концепции «Smart Grid». Эффективные методы нейтрализации негативного взаимного влияния сети и нагрузок соответствуют концепция «Smart Grid» используют новые компоненты технологий FACTS с комплексным распространением действия этой концепции на централизованные сети электроснабжения и нагрузки в целях достижения их более эффективного состояния [2;3]. Технологии, применяемые в рамках концепции FACTS (Flexible Alternative Current Transmission System), реализуются в виде управляемых, так называемых, гибких систем передачи переменного тока, в которых используются устройства современной силовой электроники с цифровыми системами управления [4]. Сущность концепции заключается в превращении электрической сети из пассивного устройства, предназначенного для транспорта электроэнергии, в активную систему, управляющую режимами функционирования электрических сетей. В связи с этим, необходимо отметить функции, которые реализуются с применением устройств FACTS:

- перераспределение потоков мощности;
- повышение экономичности и снижение потерь электроэнергии в сетях;
- повышение пропускной способности электрических сетей;
- ограничение токов короткого замыкания.

Для реализации перечисленных функций применяются статические компенсаторы реактивной мощности (SVC) и синхронные компенсаторы (STATCOM), а также линейка гибридных активных фильтров (UPFC).

Необходимо отметить, что системы SVC и STATCOM [5] не способны осуществлять коррекцию гармонических составляющих и иных показателей качества напряжения, которые влияют на размеры потерь электроэнергии, и, непосредственно, на технологический процесс производства. Система UPFC, осуществляющая коррекцию формы тока и напряжения, как универсальное средство компенсации искажений параметров качества электроэнергии, характеризуется большими массогабаритными показателями по сравнению

с оборудованием типа STATCOM или последовательным синхронным статическим компенсатором вида SSSC [6].

Материалы и методы

В программном обеспечении функций устройств FACTS используются алгоритмы вычисления необходимости и достаточности компенсационных действий, на основе измеренных текущих и рассчитанных мгновенных значений фазного тока, без контроля актуальных параметров технологического процесса, и это обстоятельство может выражаться в избыточности или недостаточности компенсационного действия, остаточном уровне искажений, и, как следствие, влиять на ход технологического процесса [7]. В связи с этим, существует необходимость в использовании результатов достаточной осведомленности о состоянии сети в целях повышения эффективности компенсационных процессов. В связи с тем, что в настоящее время имеются результаты исследований, подтверждающих возможности предсказывать параметры электрической схемы замещения устройств регулируемых электроприводов и электродуговых установок, то вполне реальным может быть обеспечение эффективного управляемого компенсирующего воздействия с использованием устройств FACTS [8].

В общем виде технологический цикл технологий “Smart Grid” в распределительной сети 20кВ будет иметь вид, показанный на рисунке 1 [9]:

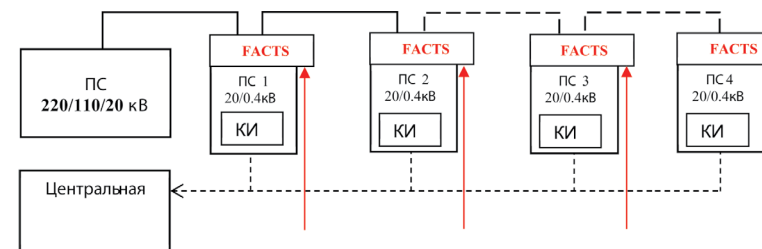


Рисунок 1 – Использование технологий “Smart Grid” на подстанциях и ЛЭП 20кВ

В этом случае, цифровая система непрерывного мониторинга качества электроэнергии (электрической энергии) обнаруживает на подстанции отклонения фактических значений показателей качества электроэнергии (ПКЭ) от нормативных. Компьютер, установленный на диспетчерском пункте ЦДС, с учетом поступающей информации с подстанции, подает команды устройствам FACTS [10], размещенным на подстанции, для компенсации и возникающих искажений формы тока и напряжения.

Для того, чтобы достаточно точно определять, на какой подстанции или участке ЛЭП произошло снижение качества электроэнергии и увеличены размеры потерь по сравнению с базовыми значениями, необходимо на каждой подстанции производить измерения напряжений, токов, активной, реактивной, полной приведенной мощности. Дополнительными измеряемыми и вычисляемыми параметрами должны быть косинусы, тангенсы, углы фазные и средние, активная и реактивная энергия в двух направлениях. В этом случае большое значение имеет достоверность результатов измерений и размеры возникающих при этом погрешностей. Устройства FACTS также осуществляют коррекцию иных отклонений в необходимом и достаточном виде в целях обеспечения непрерывного качества электрической энергии. Диспетчер ЦДС может при необходимости управлять высоковольтными выключателями [11]. Также на каждой подстанции осуществляется контроль состояния оборудования с применением различных датчиков. Таким образом, технологии «Smart Grid» позволяют обеспечивать необходимое качество электрической энергии не только за счет текущего контроля и управления параметрами электрической энергии, но и за счет непрерывного мониторинга состояния оборудования, обеспечивающего качество электрической энергии или в значительной степени влияющего на него [12]. Анализ результатов моделирования напряжения сети, токов сети, нагрузки и результатов компенсации [13] проведен на рисунке 2.

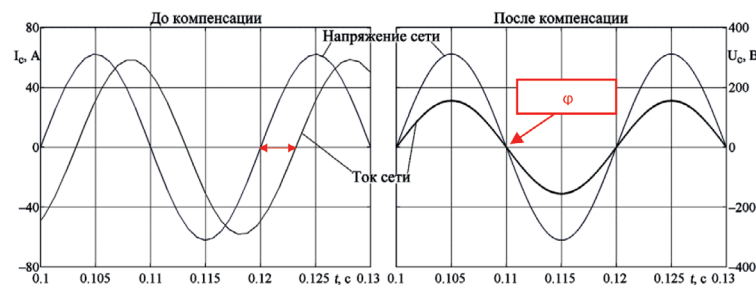


Рисунок 2 – Сравнение фаз напряжения и тока сети до компенсации и после компенсации

На левом графике рисунка 2 можно видеть сдвиг по фазе между напряжением и током сети, который возникает при индуктивном характере нагрузки с отставанием фазы тока. На правом графике рисунка, благодаря работе емкостного компенсатора, они становятся сфазированными. Также за счет отсутствия в токе сети реактивной составляющей мощности, уменьшается и амплитуда сетевого тока, и, следовательно, потребляемая

полная мощность, тем самым повышается энергетическая эффективность процесса. В таком упрощенном виде можно представить идеальный процесс компенсации реактивной мощности. Необходимо отметить, что в составе оборудования FACTS могут применяться различные автоматизированные корректирующие, компенсирующие и регулирующие устройства на базе силовой электроники, и необходимость их использования на подстанции будет зависеть от местных условий и совокупных характеристик электроустановок потребителей [7].

Механизмы влияния нагрузок на питающую сеть могут рассматриваться в виде воздействия нелинейных нагрузок на качество электроэнергии в питающей сети посредством искажений синусоидальной формы тока и снижения значений коэффициента мощности (power factor, PF). В случаях высокой степени влияния нагрузок, значения коэффициента мощности могут снижаться до уровня значений 0.5-0.6. Необходимо учитывать, что влияние нагрузок на питающую сеть может выражаться в быстропеременных процессах, продолжительность которых составляет единицы миллисекунд, и нейтрализация такого влияния потребует использования быстродействующих компенсирующих устройств, реализация которых возможна только с использованием современных цифровых технологий мониторинга и управления, а также скоростных безынерционных исполнительных устройств на базе силовой электроники. Например, применение в целях компенсации реактивной мощности батарей конденсаторов, ступенчатая коммутация которых осуществляется электромеханическими контактными устройствами (контакторами), позволяет реагировать на включение индуктивной нагрузки у потребителя, а также на появление потребности в реактивной мощности. Реагирование в этом случае осуществляется с временными задержками продолжительностью 0.5-1 секунд, и до подключения батарей, примерно в течение 1 секунды в сети будет иметь место не скомпенсированная реактивная мощность, обуславливающая возникновение потерь энергии. После отключения индуктивной нагрузки, задержка в отключении батарей создает эффект избыточной компенсации в течение примерно 1 секунды, что также влияет на размеры потерь. В распределительной сети может происходить множество таких быстротекущих инерционных процессов, которые сопровождаются потерями энергии.

Нейтрализация влияния нагрузок на питающую сеть может осуществляться с использованием разных технологий, которые в различной степени способны снижать такое влияние.

Результаты и обсуждение

В данной работе перспективная структурная схема распределительной сети напряжением 20 кВ дополнительно включает децентрализованные

источники возобновляемой энергетики в виде ВЭС или солнечной электростанции, систему накопления энергии (СНЭ) и зарядные станции электротранспорта. Общая структурная схема распределительной сети напряжением 20 кВ, для которой выполняется данный анализ, в перспективном виде представлена на рисунке 3:



Рисунок 3 – Перспективная структурная схема распределительной сети напряжением 20 кВ

Системы накопления энергии (СНЭ) отличаются от обычных аккумуляторов большой зарядной емкостью, которая может составлять тысячи ампер-часов. В периоды максимальной нагрузки, в точке подключения СНЭ, сеть способна выдавать мощность, превышающую мощность подстанции 110/20кВ, так как мощность будет подаваться одновременно и от подстанции, и от СНЭ. В этом случае в узлах подключения СНЭ поддерживается нормативный уровень напряжения в периоды максимальных нагрузок, что обуславливает снижение потерь энергии и обеспечения качества электрической энергии.

В такой схеме СНЭ может быть и нагрузкой в период заряда накопителя энергии, и источником энергии, для которого сеть является нагрузкой. Для децентрализованных источников возобновляемой энергетики в виде ВЭС или солнечной электростанции распределительная сеть также является нагрузкой. В этих случаях необходимо применять технологии, нейтрализующие взаимные негативные влияния источников и нагрузок.

Перспективная структурная схема распределительной сети напряжением 20 кВ дополнительно включает децентрализованные источники возобновляемой энергетики в виде ВЭС или солнечной электростанции,

систему накопления энергии (СНЭ) и зарядные станции электротранспорта. В качестве примера, можно рассмотреть технологический вариант, позволяющий обеспечивать:

- полную защиту источника энергии от влияния нагрузок;
- стабильность напряжения, подаваемого на электроустановки потребителей
- децентрализованную генерацию мощности в периоды максимального потребления

Рассматривается схема электроснабжения нелинейной нагрузки потребителя, которая может оказывать значительное влияние на питающую сеть. Данная схема способна обеспечить качественное электроснабжение нагрузок, использующих напряжение переменного тока [11], с полным исключением влияния режимов потребления энергии на сеть. Рассмотрим рисунок 4, на котором показана структурная схема электроснабжения сетевой нагрузки, имеющая защиту от взаимного влияния:

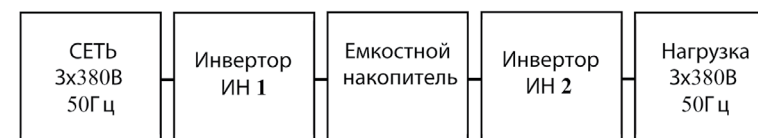


Рисунок 4 – Структурная схема электроснабжения сетевой нагрузки, имеющая защиту от взаимного влияния.

В качестве источника электроснабжения используется централизованная сеть. Инвертор ИН1 обеспечивает сопряжение параметров напряжения сети с емкостным накопителем энергии ЕН. Инвертор ИН2 обеспечивает синхронное преобразование постоянного напряжения в стандартное переменное трехфазное напряжение с параметрами, установленными соответствующими стандартами [7]. Далее в работе такой преобразователь параметров электроэнергии с вставкой постоянного тока сокращенно обозначен как ППЭ ВПТ. Такая схема обеспечивает полную защиту распределительной сети от влияния нагрузок и стабильность напряжения сети и его формы, подаваемого на электроприемники электроустановок потребителей. Нужно отметить очень важное свойство такой схемы, так как в период максимальной потребности в мощности у потребителя, система может выдавать мощность, намного превышающую пропускную способность сети за счет использования энергии накопителя. Такое свойство позволяет предотвратить перегрузки сети и снижать потери энергии.

На рисунке 5 приведена принципиальная схема силовой части ППЭ ВПТ [14]:

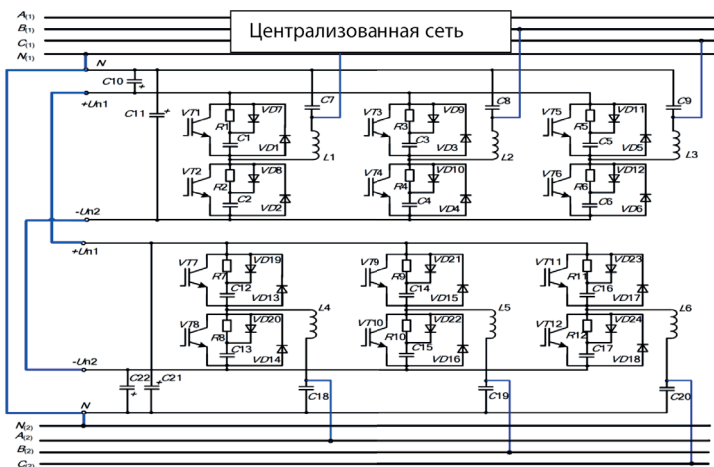


Рисунок 5 – Принципиальная схема силовой части ППЭ ВПТ

Нужно отметить, что принцип двойного преобразования энергии, является наиболее востребованным и непрерывно совершенствуется, как в части общих схемных решений, так и в части применяемой элементной базы. В связи с этим, необходимо рассмотреть более подробно данную технологию.

Преобразователи параметров электроэнергии с вставкой постоянного тока (ППЭ ВПТ) применяются для подключения к централизованной сети ветрогенераторов, применяемых в Акмолинской области, что позволяет устранить взаимные влияния генерации и сети, а также значительно упростить технологию генерации в части синхронизации частоты и напряжения.

Силовая часть инверторов реализуется на основе интеллектуальных силовых модулей (IPM). Современный IPM гибридный модуль создан на базе скоростных IGBT-транзисторов, включаемых в определенной конфигурации, цифровой системы управления, схемы защиты от перегрузок и индикации текущего состояния.

Необходимые требования реализованы в модулях, созданных на базе технологии SKiiP (Semikron integrated intelligent Power). Например, модуль SKiiP3614GB17E4-6DL 6GB, с максимальным коммутируемым напряжением 1700 вольт, и максимальным током 3600А, при параллельном подключении двух модулей, может применяться для управления нагрузкой в сетях 0.4 кВ с потребляемой мощностью 2,5 МВт, и устанавливаться на подстанциях 20/0.4 кВ. В качестве вставки постоянного тока могут применяться конденсаторы большой емкости, а также накопители энергии, которые аккумулируют энергию в периоды минимального спроса у потребителей.

На рисунке 6 представлена блочная схема подключения ветрогенератора к распределительной сети (показана на рисунке 6) с использованием технологии двойного преобразования энергии:

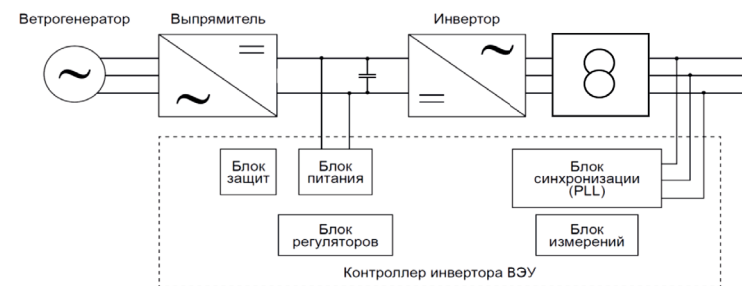


Рисунок 6 – Блочная схема подключения ветрогенератора к централизованной сети

Данная схема обеспечивает полную защиту источника энергии от влияния сетевых нагрузок и стабильность напряжения, подаваемого в сеть и на нагрузки потребителей. В такой схеме ветрогенератор может генерировать переменное напряжение с произвольной частотой и не нуждается в синхронизации, что значительно упрощает конструкцию ветрогенератора, а функция синхронизации реализуется в инверторе.

Нужно отметить, что во время аварийных режимов с провалами напряжения, емкости конденсатора вставки постоянного тока будет недостаточно для обеспечения энергией нормальных режимов инвертора. В связи с этим, существует необходимость в увеличении энергетической емкости вставки постоянного тока посредством применения накопителя энергии в виде суперконденсатора с большой емкостью, или накопителя энергии на основе аккумуляторов. В настоящее время уже созданы и применяются силовые конденсаторы большой емкости, которые получили название суперконденсаторов, например, можно в качестве накопителя энергии использовать батарею суперконденсаторов фирмы Maxwell 2.7V3000F с DC-DC конвертором, который будет формировать нужное напряжение вставки постоянного тока.

Применение накопителя энергии позволяет значительно увеличить эффективность в применении ветрогенератора, так как периоды максимальной ветровой активности далеко не всегда не совпадают с периодами максимальной потребности в мощности, и накопитель энергии позволяет решать такие проблемы.

На рисунке 7 представлена блочная схема подключения ветрогенератора к централизованной сети с использованием технологии двойного преобразования энергии с накопителем энергии в виде суперконденсатора:

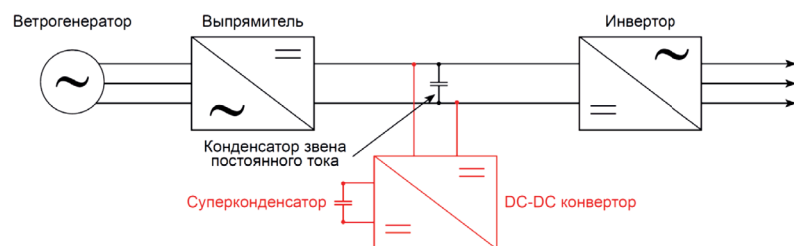


Рисунок 7 – Блочная схема подключения ветрогенератора к централизованной сети с использованием накопителя энергии

В периоды максимальной ветровой активности производится накопление энергии, а в период максимальной потребности в мощности, система может выдавать мощность, намного превышающую мощность ветрогенератора за счет дополнительного использования энергии накопителя. В настоящее время в Казахстане планируется применение накопителей энергии на ВЭС в целях повышения эффективности такой генерации.

В целях нейтрализации влияния нагрузок на питающую сеть применяются различные традиционные технологии, которые в настоящее время дополнительно включают элементы силовой электроники и цифрового управления. К таким технологиям можно отнести применение управляемых фильтров и реакторов, компенсаторов реактивной мощности, реализованных на основе силовой электроники.

Если рассмотренные технологии предназначены для компенсации последствий воздействия нагрузок на сеть, то в настоящее время созданы технологии, которые позволяют предотвращать такое воздействие. Методы активной компенсации и фильтрации реализуются за счет использования средств коррекции коэффициента мощности (Power Factor Correction, PFC) или посредством включения активных шунтирующих фильтров в месте электрического подключения технологического комплекса [15].

Наиболее широкое распространение у промышленных потребителей энергии имеют относительно не дорогие в применении управляемые компенсаторы реактивной мощности УКРМ с тиристорным управлением, которые могут быть реализованы в виде тиристорно-управляемых реакторов (ТУР) или в виде тиристорно-переключаемых конденсаторов (ТПК)[16;17].

В составе конструкции ТУР имеется конденсатор с фиксированной емкостью и индуктивный реактор с тиристорным управлением. Включение ТУР по схеме «звезда» в сети в составе УКРМ показана на рисунке 8:

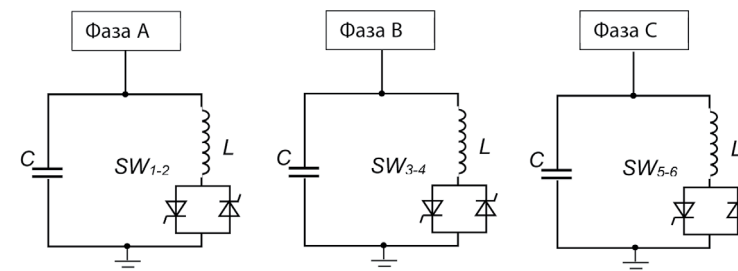


Рисунок 8 – Схема включения тиристорно-управляемых реакторов по схеме «звезда» в трехфазной сети в составе УКРМ

Изменение угла открытия тиристоры изменяет значение действующего тока через реактор, и это изменение регулирует величину действующей индуктивности, что позволяет обеспечить непрерывность процесса управления, высокое быстродействие и отсутствие переходных процессов. Нужно отметить, что ТУР генерируют токи высших гармоник [16], что потребует установки дополнительных фильтров компенсирующих устройств и соответствующего удорожания устройства компенсации [17]. ТПК позволяют реализовать принцип регулирования реактивной мощности ступенями [18]. На рисунке 9 показана схема включения ТПК в трехфазной сети по схеме «звезда» в составе УКРМ:

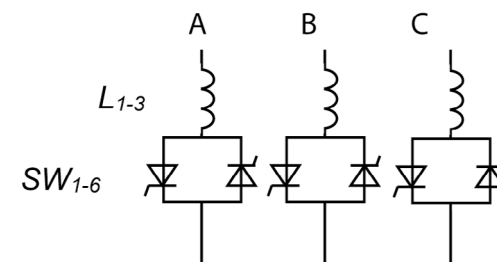


Рисунок 9 – Схема подключения ТПК в составе УКРМ

Комбинированный УКРМ может содержать тиристорно-управляемые реакторы и тиристорно-переключаемые конденсаторы.

Определенную ценность для практической реализации управляемой компенсации реактивной мощности (УКРМ) имеет технология использования «buck-преобразователя», который позволяет выдавать в сеть столько реактивной мощности от конденсатора, сколько нужно в данный момент времени [18] (рисунок 10):

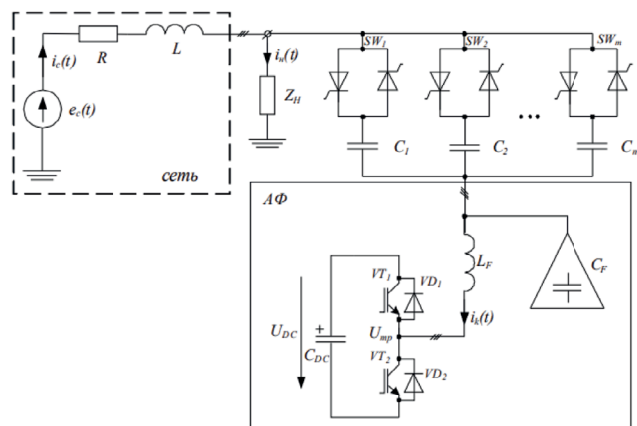


Рисунок 10 – Схема использования buck-преобразователя

Такая схема имеет название динамического конденсатора, действие которого подобно функциям статического компенсатора вида СТАТКОМ. Управление каждой фазой в случае использования динамического конденсатора осуществляется без взаимодействия с иными фазами.

Выводы

Таким образом, на основании вышеизложенного можно сделать вывод о том, что сущность концепции заключается в превращении электрической сети из пассивного устройства, предназначенного для транспорта электроэнергии, в активную систему, управляющую режимами функционирования электрических сетей. В связи с этим, необходимо отметить функции, которые реализуются с применением устройств FACTS:

1 Проблему повышения энергетической эффективности распределительных сетей напряжением 20кВ необходимо рассматривать в комплексном виде, на основе системного подхода к решению данной проблемы.

2 Наиболее выгодным и эффективным решением проблемы повышения энергетической эффективности сетей является нейтрализация влияния нагрузок на сеть по сравнению с устранением последствий такого влияния.

3 Эффективные методы нейтрализации негативного взаимного влияния сети и нагрузок предусматриваются концепцией “Smart Grid”, в рамках которой используются новые компоненты FACTS второго и третьего поколения с комплексным распространением действия этой концепции распределительные сети электроснабжения напряжением 20 кВ.

4. По линиям распределительных сетей должна передаваться активная мощность, а источники и потребители реактивной мощности должны располагаться на стороне приема электрической мощности.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Баскаков, С. И.** Радиотехнические цепи и сигналы [Текст] / С. И. Баскаков. – М. : Высш. шк., 2020. – 462 с.

2 **Богатырев, Л. Л.** Математическое моделирование режимов электрической энергии С в условиях неопределенности [Текст] / Л. Л. Богатырев, В. З. Манусов, Д. Содномдорж. – Улан-Батор : Изд-во типографии МГТУ, 2019. – 348 с.

3 **Богданов, В. А.** Сопоставление моделей оперативного прогноза узловых нагрузок [Текст] / В. А. Богданов, Э. В. Денисенко // Изв. АН.. Сер. Энергетика и транспорт. –2022. – № 3. – С. 3–10.

4 **Gonzalez, G.** Strategic Plan for the Control and Reduction of Non-Technical Losses applied in C.A. Energia Electrica de Valencia / G. Gonzalez, L. Figueroa // ieeexplore.ieee.org: digital library. – Caracas, 2007. – Digital Object Identifier: 10.1109/TDCLA.2006.311491. – URL: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs-02.04.2017>.

5 **Lai, L. L.** A review on energy loss development [Электронный ресурс] / L. L. Lai // ieeexplore.ieee.org: digital library. – Pittsburgh, 2008. – Digital Object Identifier : 10.1109/PES.2008.4596810. – URL : <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs.-12.08.2018>.

6 **Савина, Н. В.** Исследование погрешности учета электроэнергии при ее низком качестве [Текст] / Н. В. Савина, Ю. В. Мясоедов // Вестник Амурского государственного университета. – Благовещенск : Изд-во Амур. гос. ун-та, 2021. – № 13. – С. 45–48.

7 **Escobar G., Valdez A. A., Torres Olguin R. E., Martinez, Montejano M.** F. A Model Based Controller for a Three Phase Four Wire Shunt Active Filter with Compensation of the Neutral Line Current. – IEEE Trans. Power Electronics, 2017, Issue 6, Vol. 22.

8 **Дьяконов, В. П.** Математические пакеты расширения MATLAB [Текст] : специальный справочник / В. П. Дьяконов, В. Круглов. – СПб. : Питер, 2021. – 480 с.

9 **Гамм, А. З.** Наблюдаемость электроэнергетических систем [Текст] / А. З. Гамм, И. И. Голуб. – М. : Наука, 2020. – 220 с.

10 **Гурский, С. К.** Адаптивное прогнозирование временных рядов в электро-энергетике [Текст] / С. К. Гурский. – Минск : Наука и техника, 2016.

11 **Бендат, Дж.** Применение корреляционного и спектрального анализа [Текст] : [пер. с англ.] / Дж. Бендат, А. Пирсол. – М. : Мир, 2013. – 312 с.

12 **Вентцель, Е. С.** Теория вероятностей [Текст] / Е. С. Вентцель. – М. : Высшая школа, 2019. – 576 с.

13 **Савина, Н. В.** Возможности вейвлет анализа при диспетчерском и технологическом управлении энергообъектами [Текст] / Н. В. Савина, Л. А. Гурина, Ю. В. Мясоедов // Энергетика России в XXI веке: развитие, функционирование, управление : сб. трудов Всероссийской конференции. – Иркутск, 2015. – С. 635–642.

14 **Савина, Н. В.** Системный анализ потерь электроэнергии в электрических распределительных сетях [Текст] : моногр. / Н. В. Савина ; отв. ред. Н. И. Воропай. – Новосибирск : Наука, 2018. – 228с. – 500 экз. – ISBN 978–5–02–023222–8.

15 **Леоненков, А. В.** Нечеткое моделирование в среде MATLAB и FUZZY TECH [Текст] / А. В. Леоненков // СПб. : БХВ, 2013. – 736 с.

16 **Yan Xu, Tolbert L.M., Kueck J.D.** Voltage and Current Unbalance Compensation Using a Parallel Active Filter. – Power Electronics Specialists Conf. (PESC 2007), 2017.

17 **Гамм, А. З.** Вероятностные модели режимов электроэнергетических систем [Текст] / А. З. Гамм. – Новосибирск : Наука, 2017. – 133 с.

18 **Гамм, А. З.** Методологические вопросы оценивания состояния и идентификации в энергетических системах [Текст] / А. З. Гамм // Вопросы оценивания и идентификации в энергетических системах. – Иркутск, 2015. – С. 29–51.

REFERENCE

1 **Baskakov, S. I.** Radiotekhnicheskie cepi i signaly [Radio engineering circuits and signals] [Text] / S. I. Baskakov, Moscow: Higher School, 2020–462 p.

2 **Bogatyrev, L. L.** Matematicheskoe modelirovanie rezhimov elektricheskoy energii s v usloviyah neopredelennosti [Mathematical modeling of electric energy modes with uncertainty] [Text] / L. L. Bogatyrev, V. Z. Manusov, D. Sodnomdorzh.

– Ulaanbaatar : Publishing House of the Moscow State Technical University Printing House, 2019. – 348 p.

3 **Bogdanov, V. A.** Sopotavlenie modelej operativnogo prognoza uzlovyh nagruzok [Comparison of models of operational forecasting of nodal loads] [Text] / V. A. Bogdanov, E. V. Denisenko // Izv. AN.. Ser. Energy and transport. –2022. – No. 3. – P. 3–10.

4 **Gonzalez, G.** Strategic Plan for the Control and Reduction of Non-Technical Losses applied in C.A. Energia Electrica de Valencia / G. Gonzalez, L. Figueroa // ieeexplore.ieee.org: digital library. – Caracas, 2007. – Digital Object Identifier: 10.1109/TDCLA.2006.311491. – URL: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs-02.04.2017>.

5 **Lai, L. L.** A review on energy loss development Electronic resource / L. L. Lai // ieeexplore.ieee.org : digital library. – Pittsburgh, 2008. – Digital Object Identifier : 10.1109/PES.2008.4596810. – URL : <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs-12.08.2018>.

6 **Savina, N. V.** Issledovanie pogreshnosti ucheta elektroenergii pri ee nizkom kachestve [Investigation of the error of electricity metering with its low quality] [Text] / N. V. Savina, Yu. V. Myasoedov // Bulletin of the Amur State University. Blagoveshchensk : Publishing House of Amur State University, 2021. No. 13. P. 45–48.

7 **Escobar G., Valdez A.A., Torres Olguin R.E., Martinez, Montejano M.F.** A Model-Based Controller for a Three-Phase Four-Wire Shunt Active Filter with Compensation of the Neutral Line Current. – IEEE Trans. Power Electronics, 2017, Issue 6, Vol. 22.

8 **Dyakonov, V. P.** Matematicheskie pakety rasshireniya MATLAB [Mathematical MATLAB extension packages] [Text] : a special reference book / V. P. Dyakonov, V. Kругlov. – St. Petersburg : Peter, 2021. – 480 p.

9 **Gamm, A. Z.** Nablyudaemost' elektroenergeticheskikh sistem [Observability of electric power systems] [Text] / A. Z. Gamm, I. I. Golub. – М. : Nauka, 2020. – 220 p.

10 **Gursky, S. K.** Adaptivnoe prognozirovaniye vremennykh ryadov v elektro-energetike [Adaptive forecasting of time series in electric power engineering] [Text] / S. K. Gursky. – Minsk : Science and Technology, 2016.

11 **Bendat, J.** Primenenie korrelyatsionnogo i spektral'nogo analiza [Application of correlation and spectral analysis] [Text] : [trans. from English] / J. Bendat, A. Pearsol. – М. : Mir, 2013. – 312 p.

12 **Wentzel, E. S.** Teoriya veroyatnostej [Probability theory] [Text] / E. S. Wentzel. Moscow : Higher School, 2019. 576 p.

13 **Savina, N. V.** Vozmozhnosti vejvlet analiza pri dispetcherskom i tekhnologicheskomo upravlenii energoob'ektami [Possibilities of wavelet analysis

in dispatching and technological management of power facilities] [Text] / N. V. Savina, L. A. Gurina, Yu. V. Myasoedov // Russian energy industry in the 21st century: development, functioning, management : proceedings of the All-Russian Conference. Irkutsk, 2015. P. 635–642.

14 **Savina, N. V.** Sistemnyj analiz poter' elektroenergii v elektricheskikh raspredelitel'nyh setyah [System analysis of electricity losses in electric distribution networks] [Text] : monograph / N. V. Savina ; edited by N. I. Voropai. Novosibirsk : Nauka Publ., 2018. 228 p. – 500 copies. – ISBN 978-5-02-023222-8.

15 **Leonenkov, A. V.** Nechetkoe modelirovanie v srede MATLAB i FUZZY TECH [Fuzzy modeling in MATLAB and FUZZY TECH] [Text] / A. V. Leonenkov // St. Petersburg : BHV, 2013– 736 p.

16 **Yan Xu, Tolbert L. M., Kueck J. D.** Voltage and Current Imbalance Compensation Using a Parallel Active Filter. – Power Electronics Specialists Conf. (PESC 2007), 2017.

17 **Gamm, A. Z.** Veroyatnostnye modeli rezhimov elektroenergeticheskikh sistem [Probabilistic models of electric power systems modes] [Text] / A. Z. Gamm. Novosibirsk : Nauka Publ., 2017. 133 p.

18 **Gamm, A. Z.** Metodologicheskie voprosy ocenivaniya sostoyaniya i identifikatsii v energeticheskikh sistemah [Methodological issues of state assessment and identification in energy systems] [Text] / A. Z. Gamm // Issues of assessment and identification in energy systems. Irkutsk : SEI SB RAS, 2015. P. 29–51.

Поступило в редакцию 20.04.25

Поступило с исправлениями 15.07.25

Принято в печать 05.09.25

*А. Т. Балтин¹, Ж. Р. Исаева², А. Д. Бердалиев³

^{1,2}С. Сефуллина атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Қазақстан Республикасы, Астана қ.

³«Астана АЭК» АҚ, Қазақстан Республикасы, Астана қ.

20.04.25 ж. баспаға түсті.

15.07.25 ж. түзетулерімен түсті.

05.09.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

КЕРНЕУІ 20КВ ТАРАТУ ЖЕЛІЛЕРІНІҢ ЭНЕРГИЯ ТИІМДІЛІГІН АРТТЫРУҒА ЖАҢАРТЫЛАТЫН ЭНЕРГИЯ КӨЗДЕРІН ПАЙДАЛАНУ ЖӘНЕ ОЛАРДЫҢ ЫҚПАЛЫ

*Бұл мақалада кернеуі 20 кВ тарату желілерінің энергия тиімділігін
арттыруда жаңартылатын энергия көздерін (ЖЭС) пайдалану*

және оның әсері туралы зерттеулер жүргізілді және «Smart Grid» тұжырымдамасын практикалық іске асыру ұсынылды, бұл оны өндіру, тасымалдау және тұтыну кезінде электр энергиясының шығынын азайту, сондай-ақ тұтынушыларды энергиямен жабдықтау сапасын арттыру тәсілдерінің бірі болып табылады. Осыған байланысты, «Smart Grid» деп аталатын электрмен жабдықтау желілерін дамытудың жаңа тұжырымдамасы негізінде заманауи жабдықтарды кешенді енгізу электр энергетикасын цифрландыру бөлігінде елдің цифрлық экономикасы туралы жалпы түсініктерге толық сәйкес келеді және желінің энергетикалық тиімділігін арттыру мәселелерін жаңа технологиялық деңгейде шешуге мүмкіндік береді. Отандық «ақылды желілер» деп аталатын «Smart Grid» тұжырымдамасының мәні желілердің тиімділігі мен электр энергиясының сапасын арттыру, сондай-ақ желідегі энергия шығынын азайту болып табылады. ЖЭС немесе күн электр станциясы түріндегі жаңартылатын энергетиканың орталықтандырылмаған көздерін, энергияны жинақтау жүйесін және электр көлігінің зарядтау станцияларын қоса алғанда, кернеуі 20 кВ тарату желісінің перспективалық құрылымдық схемасы ұсынылды. Мақалада өзара әсерден қорғайтын желілік жүктемені Электрмен жабдықтаудың құрылымдық схемасы және жел генераторын тарату желісіне қосудың блоктық схемасы келтірілген.

Кілтті сөздер: 20кВ желілер, ақылды желілер, ЖЭК, қосалқы станция, энергия тиімділігін арттыру.

*A. Baltin¹, Zh.Isaeva², A.Berdaliev³

^{1,2}S. Sefullin Kazakh Agrotechnical Research University, Republic of Kazakhstan, Astana

³JSC «Astana REC», Republic of Kazakhstan, Astana

Received 20.04.25

Received in revised form 15.07.25

Accepted for publication 05.09.25

THE USE AND IMPACT OF RENEWABLE ENERGY SOURCES IN IMPROVING THE ENERGY EFFICIENCY OF 20 KV DISTRIBUTION NETWORKS

In this article, research has been carried out on the use and impact of renewable energy sources in improving the energy efficiency of 20 kV distribution networks, and a practical implementation of the «Smart Grid»

concept has been proposed, which is one of the ways to reduce electricity losses during its production, transportation and consumption, as well as improving the quality of energy supply to consumers. In this regard, the comprehensive implementation of modern equipment based on a new concept for the development of electricity supply networks, called «Smart Grid», fully corresponds to the general ideas about the digital economy of the country in terms of digitalization of the electric power industry, and allows solving the problems of increasing the energy efficiency of the network at a new technological level. The meaning of the «Smart Grid» concept, which has the domestic name «smart grids», is to increase the efficiency of networks and the quality of electricity, as well as to reduce energy losses in the network. A promising structural scheme of a 20 kV distribution network is proposed, which additionally includes decentralized sources of renewable energy in the form of wind farms or solar power plants, an energy storage system (EES) and electric vehicle charging stations. The article presents a block diagram of the power supply of the network load, which is protected from mutual influence, and a block diagram of connecting the wind generator to the distribution network.

Keywords: 20 kV networks, smart grids, renewable energy sources, substation, energy efficiency improvement.

МРНТИ 44.01.11

<https://doi.org/10.48081/NVGA2740>

**А. Б. Бекбаев¹, *Р. С. Ахамбаев², С. А. Минажова³,
А. Д. Бердімұрат⁴, Н. Ж. Налибаев⁵**

^{1,2,3}Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева, Республика Казахстан, г. Алматы.

^{4,5}ТОО «QazNRG Group». Республика Казахстан, г. Алматы.

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3520-1710>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1707-7042>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5461-2251>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-6425-8778>

⁵ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5285-541X>

*e-mail: r.akhambayev@satbayev.university

ЭНЕРГОЭКСПЛУАТАЦИЯ ЗДАНИЙ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ С ИНТЕГРИРОВАННЫМИ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭНЕРГИИ

В условиях глобальных климатических изменений и стремительного роста энергопотребления возрастает необходимость повышения энергоэффективности зданий и внедрения устойчивых решений в области энергетики. Настоящая работа посвящена вопросам энергоэксплуатации зданий с акцентом на обеспечение их устойчивости за счёт интеграции возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Рассматриваются современные технологии и стратегии управления энергопотреблением, включая использование солнечных панелей, тепловых насосов, ветрогенераторов и систем накопления энергии. Особое внимание уделено интеллектуальным системам управления зданием (ИСУЗ), позволяющим оптимизировать потребление ресурсов и минимизировать углеродный след. Анализируются примеры успешной интеграции ВИЭ в жилые и коммерческие объекты, а также даются рекомендации по проектированию и эксплуатации зданий с учётом требований устойчивого развития. Работа направлена на поддержку перехода к низкоуглеродной экономике и повышение экологической устойчивости городской среды.

В связи с проблемами, вызванными изменением климата, растёт популярность экологических зданий. Более того, становится необходимым обеспечить устойчивое развитие посредством управления эксплуатацией новых и возобновляемых источников энергии. В связи с этим в данной статье описывается предложение и эмпирическая демонстрация метода оптимизации энергоснабжения зданий, интегрированных в возобновляемые источники энергии, с использованием фотоэлектрических систем (ФЭС) и систем накопления энергии (СЭ).

Ключевые слова: Энергоэксплуатация зданий, возобновляемые источники энергии, энергоэффективность, интеллектуальные системы управления, здание с нулевым энергопотреблением, экологическая устойчивость, энергосбережение, интеграция ВИЭ.

Введение

Современные тенденции в строительстве и эксплуатации зданий всё чаще ориентированы на принципы устойчивого развития, энергоэффективности и экологической безопасности. В условиях нарастающего дефицита ископаемых энергетических ресурсов, роста тарифов на энергию и ухудшения экологической обстановки возрастает значимость использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в системах энергоснабжения зданий. Интеграция ВИЭ в архитектуру и инженерные системы объектов недвижимости становится неотъемлемой частью стратегии по снижению углеродного следа и переходу к устойчивой городской среде.

Целью настоящей работы является эмпирическая демонстрация и оценка эффективности метода оптимизации энергоснабжения зданий, интегрированных с возобновляемыми источниками энергии, на основе использования фотоэлектрических систем (ФЭС) и систем накопления энергии (СЭ), в контексте обеспечения их энергетической устойчивости, снижения зависимости от внешних источников энергоснабжения и минимизации эксплуатационных затрат на электроэнергию.

Однако само по себе наличие ВИЭ в здании не гарантирует его эффективной и устойчивой работы. Необходима грамотная организация энергоэксплуатации - комплекса мероприятий, направленных на рациональное использование энергии, контроль и управление энергетическими потоками, поддержание требуемых микроклиматических условий и обеспечение надежности инженерных систем. Энергоэксплуатация зданий с интегрированными ВИЭ требует применения интеллектуальных систем управления, анализа энергопрофиля, а также учета климатических, архитектурных и эксплуатационных факторов.

Новизна представленного исследования заключается в комплексном подходе к энергоэксплуатации зданий с интегрированными возобновляемыми источниками энергии, ориентированном на достижение устойчивости и энергонезависимости за счёт оптимального сочетания фотоэлектрических систем (ФЭС) и систем накопления энергии (СЭ), а также использовании интеллектуального планирования и управления энергетическими потоками.

Настоящая работа посвящена исследованию роли энергоэксплуатации в обеспечении устойчивости зданий с интегрированными возобновляемыми источниками энергии. Рассматриваются подходы к проектированию, управлению и оптимизации энергетических систем зданий с учетом современных технологий и требований к устойчивому развитию.

Материалы и методы

В данной работе представлена эмпирическая демонстрация метода оптимизации энергоснабжения зданий, интегрированных с возобновляемыми источниками энергии, на примере использования фотоэлектрических систем (ФЭС) в сочетании с системами накопления энергии (СЭ). Целью исследования является повышение энергетической устойчивости и эффективности зданий путём рационального управления выработкой, потреблением и хранением электроэнергии.

Рост потребления энергии в жилых и коммерческих зданиях приводит к значительным выбросам парниковых газов (ПГ). На долю энергии, потребляемой зданиями, приходится 33% мирового потребления энергии и 40 % прямых и косвенных выбросов парниковых газов в мире [1;2]. Обеспечение надежных и экологических источников энергии улучшает энергоснабжение зданий, что повышает качество жизни [2].

Например, интеллектуальные активные здания и здания с нулевым потреблением энергии направлены на сохранение внутреннего теплового комфорта и минимизацию потребления энергии с целью снижения зависимости от сети и сокращения выбросов парниковых газов [3;4].

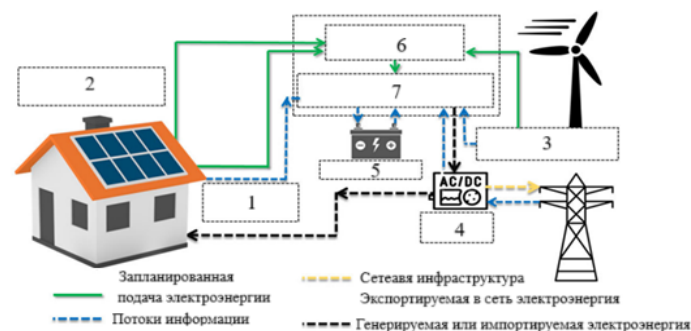


Рисунок 1 – Схема интегрированного интеллектуального активного здания с возобновляемыми источниками энергии

На представленной схеме изображена структура интеллектуального активного здания, интегрированного с возобновляемыми источниками энергии (ВИЭ) и системой управления энергоснабжением. Основные компоненты и потоки в системе следующие:

1-Здание. Представляет собой энергоэффективный объект с установленными солнечными панелями, покрывающими часть собственных потребностей в электроэнергии.

– Потребление энергии в здании. Формирует входной сигнал для системы управления, определяющий текущие и прогнозируемые потребности в энергии.

– Генерация энергии из ВИЭ

Солнечная генерация - установленные фотоэлектрические панели.

Ветровая генерация - энергия поступает от внешней ветроэнергетической установки.

– Инвертор переменного/постоянного тока. Преобразует электроэнергию между постоянным и переменным током для совместимости с различными компонентами системы и сетевой инфраструктурой.

– Накопитель энергии. Хранит избыточную электроэнергию, полученную от ВИЭ или сети, и отдаёт её при необходимости.

– Модуль прогнозирования на основе глубинного обучения. Прогнозирует будущие значения генерации и потребления энергии, используя методы искусственного интеллекта (глубинное обучение).

– Модуль планирования энергоснабжения. На основе прогнозов и текущего состояния системы определяет оптимальный график распределения энергии между ВИЭ, накопителями, зданием и сетью.

Сетевая инфраструктура. Электроэнергия может импортироваться из внешней сети или экспортироваться в неё при избытке.

Условные обозначения на схеме:

Синие линии – потоки информации.

Чёрные линии – генерируемая или импортируемая электроэнергия.

– Жёлтые пунктирные линии – экспортируемая в сеть электроэнергия.

– Зелёные линии – запланированная подача электроэнергии.

Данная схема демонстрирует тесную интеграцию ВИЭ, интеллектуальных прогнозных и управляющих модулей, накопителей энергии и внешней электросети, что позволяет зданию функционировать как активный элемент энергосистемы – одновременно потребитель и поставщик энергии.

Однако для создания интеллектуальных активных зданий применяются моделирование и прогнозирование энергопотребления зданий [5]. Системы моделирования энергопотребления интеллектуальных зданий включают модели спроса, модели предложения и гибридизацию моделей спроса и предложения для управления энергопотреблением зданий [6].

В качестве исследуемого объекта была выбрана модель типового административного здания площадью 1200 м², расположенного в умеренно-континентальном климате. Здание оснащено солнечной фотоэлектрической установкой мощностью 40 кВт и системой накопления энергии на основе литий-ионных аккумуляторов ёмкостью 80 кВт·ч. Здание подключено к внешней электрической сети и работает в режиме «гибридной» энергетической архитектуры.

Оборудование и программное обеспечение

Для сбора и анализа данных использовались следующие технические средства и программные решения:

– Фотоэлектрические панели: монокристаллические модули с КПД до 20 %.

– Система накопления энергии: аккумуляторные батареи с интеллектуальным управлением заряда/разряда.

– Инверторы и контроллеры заряда: с возможностью двусторонней связи и передачи данных.

– Система управления зданием (BMS): программный комплекс для мониторинга и управления энергетическими потоками [7].

ПО для моделирования и анализа: MATLAB/Simulink, PV*Sol, Homer Pro – для расчёта баланса энергии, моделирования сценариев потребления и оптимизации работы ФЭС и СЭ.

Сенсоры и измерители: датчики температуры, освещённости, потребления электроэнергии и уровня заряда аккумуляторов [8].

Сбор эмпирических данных: в течение трёх месяцев фиксировались данные о выработке ФЭС, потреблении здания, степени заряда СЭ и состоянии внешней сети.

Моделирование энергетических сценариев: были проанализированы различные режимы работы системы – автономный, параллельный и резервный, с учётом погодных условий и колебаний нагрузки.

Оптимизация режимов энергоснабжения: применялись алгоритмы управления энергией с целью минимизации закупки электроэнергии из внешней сети и максимизации использования энергии, полученной от ФЭС.

Оценка устойчивости: проводился анализ энергетической автономности здания, надёжности электроснабжения и сокращения выбросов CO₂.

– Критерии оценки эффективности
– Уровень самообеспечения здания (доля энергии, покрытая за счёт ВИЭ);

- Снижение затрат на электроэнергию;
- Снижение выбросов парниковых газов;
- Устойчивость энергоснабжения при отключениях внешней сети;
- Эффективность использования системы накопления энергии.

Используемый подход позволяет не только повысить энергетическую независимость зданий, но и продемонстрировать практические возможности интеграции ВИЭ в рамках устойчивой городской инфраструктуры.

Результаты и обсуждение

В ходе эмпирического исследования были получены количественные и качественные данные, позволяющие оценить эффективность метода оптимизации энергоснабжения здания с интегрированными фотоэлектрическими системами (ФЭС) и системами накопления энергии (СЭ). Результаты представлены по следующим ключевым направлениям: выработка и потребление энергии, эффективность использования систем накопления, уровень энергоавтономности и устойчивость энергоснабжения.

Метод включает поэтапное проектирование, внедрение и управление энергетической инфраструктурой здания с учётом интеграции возобновляемых источников энергии (в первую очередь - фотоэлектрических систем) и систем накопления энергии. Он направлен на достижение максимального уровня энергоавтономности при оптимальных инвестиционных и эксплуатационных затратах.

На рисунках 2 (а) и (б) показаны импорт электроэнергии из сети и стоимость электроэнергии как в системах планового, так и внепланового энергоснабжения. На этих рисунках оранжевая линия соответствует

плановому импорту электроэнергии, а синяя - внеплановому импорту электроэнергии из сети.

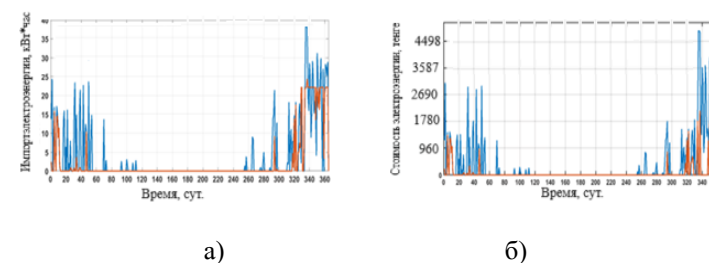


Рисунок 2 – Плановый (а) и внеплановый (б) импорт электроэнергии в сеть в 2024 году

Из графиков видно, что внеплановый импорт электроэнергии сопровождается резкими скачками как по объему, так и по стоимости, особенно в определенные периоды года. Напротив, плановый импорт демонстрирует более стабильный и предсказуемый характер, что, в свою очередь, способствует снижению затрат на электроэнергию. Эти данные наглядно показывают преимущества планового энергоснабжения с точки зрения эффективности и экономичности.

На рисунке 3 показана зарядка/разрядка накопителей энергии и экспорт электроэнергии в сеть в 2024 году. Рисунок 3 (а) иллюстрирует графики зарядки и разрядки накопителей энергии, а рисунок 3 (б) – объём экспорта электроэнергии в сеть. Как показано на рисунке 3 (а), накопители энергии играют важную роль в январе, феврале, ноябре и декабре, поскольку в эти периоды года поставки возобновляемой энергии снижаются. Исходя из этого рисунка, поставки возобновляемой энергии увеличиваются летом и уменьшаются зимой.

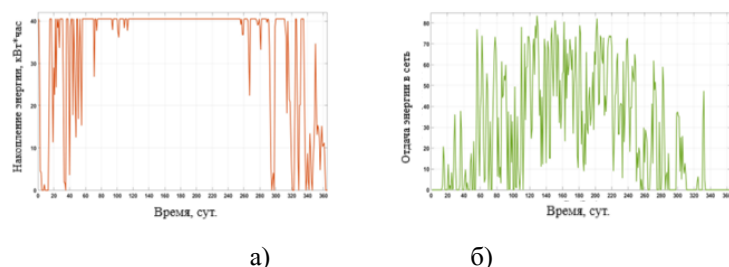


Рисунок 2 – Заряд/разряд накопителей энергии (а) и экспорт (отдача) электроэнергии (б) в сеть в 2024 году

Таким образом, накопители энергии позволяют эффективно сглаживать сезонные колебания в поставках возобновляемой энергии, обеспечивая надежность энергоснабжения в периоды дефицита и способствуя интеграции избыточной генерации в сеть в периоды изобилия.

Выработка и потребление энергии. Среднесуточная выработка электроэнергии фотоэлектрической системой составила 145 кВт·ч, при этом пиковые значения достигали 210 кВт·ч в солнечные дни. Среднесуточное энергопотребление здания находилось на уровне 165 кВт·ч, из которых:

- 52 % было покрыто напрямую от ФЭС,
- 27 % – за счёт энергии, накопленной в СЭ,
- 21 % – за счёт электроэнергии, закупаемой из внешней сети.

Эффективность систем накопления энергии (СЭ). Система накопления продемонстрировала высокий уровень эффективности - до 88% при преобразовании и хранении энергии. Использование СЭ позволило сгладить пики потребления, а также эффективно использовать избыточную выработку энергии в дневные часы. В среднем аккумуляторы обеспечивали 5–6 часов автономной работы здания без подключения к внешней сети [9].

Энергоавтономность и устойчивость. Итоговый коэффициент энергоавтономности здания составил 79 %, что означает, что почти 4/5 всех энергетических потребностей здания обеспечиваются за счёт ВИЭ и систем хранения. Проведённые стресс-тесты в условиях отключения внешнего электроснабжения показали, что здание может стабильно функционировать в течение 8–10 часов в автономном режиме при среднем уровне потребления, поддерживая базовые функции (освещение, ИТ-инфраструктура, вентиляция и др.).

Экономическая и экологическая эффективность. Снижение затрат на электроэнергию составило до 42 % по сравнению с базовым сценарием

(без ВИЭ и СЭ). Снижение выбросов CO₂ - около 19,3 тонн в год, что соответствует экологическому эффекту высадки более 950 деревьев. Ожидаемый срок окупаемости комплекса ФЭС+СЭ с учётом текущих тарифов и условий эксплуатации – 7,2 года.

Применение данного метода позволяет:

Снизить до минимума зависимость от внешней электросети, особенно в условиях нестабильного энергоснабжения.

Существенно сократить расходы на электроэнергию благодаря увеличению доли собственного производства и эффективному управлению пиковыми нагрузками.

Повысить экологическую устойчивость объекта и обеспечить соответствие современным стандартам энергоэффективности и устойчивого строительства.

Результаты демонстрируют высокую эффективность интеграции ВИЭ и систем накопления энергии в рамках концепции устойчивой энергоэксплуатации зданий. Особую роль в оптимизации энергоснабжения сыграло использование интеллектуальной системы управления (ИСУ), позволяющей гибко перераспределять энергетические потоки, учитывать прогноз погоды, уровень заряда СЭ и текущее потребление здания.

При этом выявлены и определённые ограничения: эффективность ФЭС сильно зависит от климатических условий, сезонности и ориентации здания. Кроме того, стоимость внедрения систем СЭ остаётся сравнительно высокой, особенно для объектов малого и среднего масштаба. Тем не менее, тренд на снижение стоимости компонентов и развитие нормативной базы в области устойчивого строительства создают предпосылки для масштабного внедрения подобных решений [10].

Таким образом, представленная методика может быть рекомендована как основа для развития энергоэффективных зданий нового поколения, ориентированных на принципы экологичности, надёжности и устойчивости.

Финансирование: Данное исследование финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан. Грант № BR21882294 «Автономная система энергообеспечения отдалённых регионов Казахстана на базе ВИЭ».

Выводы

Проведённое исследование, посвящённое энергоэксплуатации зданий с интегрированными возобновляемыми источниками энергии, позволило эмпирически обосновать эффективность комплексного подхода к оптимизации энергоснабжения с использованием фотоэлектрических систем (ФЭС) и систем накопления энергии (СЭ). На основе анализа полученных результатов сформулированы следующие ключевые выводы:

Интеграция ФЭС и СЭ существенно повышает энергетическую устойчивость зданий, позволяя покрыть до 79 % потребностей здания за счёт возобновляемых источников энергии, снизить зависимость от внешней электросети и обеспечить резервное питание в аварийных ситуациях.

Применение интеллектуальных систем управления (BMS) позволяет оптимизировать потребление энергии, рационально распределять нагрузку, использовать прогнозные данные и тем самым максимально эффективно использовать вырабатываемую и накопленную энергию.

Экономическая целесообразность подтверждена снижением затрат на электроэнергию до 42 % и ожидаемым сроком окупаемости энергетической системы менее 8 лет, что делает такие решения перспективными для коммерческих и общественных зданий.

Экологическая эффективность выражается в существенном сокращении выбросов парниковых газов – на уровне более 19 тонн CO₂ в год, что способствует достижению целей устойчивого развития и климатической нейтральности.

Несмотря на положительные результаты, внедрение подобных решений требует учёта ряда факторов, включая климатические особенности региона, архитектурно-планировочные характеристики здания, начальные инвестиции и уровень подготовки эксплуатационного персонала.

В целом, полученные данные подтверждают жизнеспособность и перспективность использования ФЭС и СЭ в рамках энергоэксплуатации зданий нового поколения. Разработка и внедрение подобных решений являются важным шагом на пути к формированию устойчивой, энергонезависимой и экологически безопасной городской среды.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Pérez-Andreu, V., Aparicio-Fernández, C., Martínez-Ibernón, A., Vivancos, J.-L. Impact of climate change on heating and cooling energy demand in a residential building in a Mediterranean climate. *Energy*. 2018. – Vol. 165. – P. 63–74.

2 Kim, S.-H., Lee, S., Han, S.-Y., Kim, J.-H. Scenario analysis for GHG emission reduction potential of the building sector for new city in South Korea. *Energies*. – Oct. 2020. – Vol. 13. № 20. – P. 55–14.

3 Dominković, D., Dobravec, V., Jiang, Y., Nielsen, P., Krajačić, G. Modelling smart energy systems in tropical regions. *Energy*. – Jul. 2018. – Vol. 155. P. – 592–609.

4 Vahidinasab, V., Ardalani, C., Mohammadi-Ivatloo, B., Giaouris, D., Walker, S. L. Active building as an energy system: Concept, challenges, and outlook. *IEEE Access*. – 2021. – Vol. 9. – P. 58009–58024.

5 Bourdeau, M., Zhai, X. Q., Nefzaoui, E., Guo, X., Chatellier, P. Modeling and forecasting building energy consumption: A review of data-driven techniques. *Sustainable Cities and Society*. – Jul., 2019. – Vol. 48. № 101533.

6 Li, W., Logenthiran, T., Phan, V.-T., Woo, W. L. Implemented IoT-based self-learning home management system (SHMS) for Singapore. *IEEE Internet of Things Journal*. – Jun. 2018/–Vol. 5. – № 3. – P. 2212–2219.

7 Аюев, Б. И., Давыдов, В. В., Неймин, В. Г. Анализ эффективности вычислительных моделей расчета установившихся режимов электрических систем. // *Электричество*. – 2008. – № 8. – С. 2–14.

8 Агеев, В. А. Душутин, К. А. , Дудин, А. В. Сравнительный анализ методов расчета режимов электрических сетей // *Сельский механизатор*. – 2018. – №. 1. – С. 30–33.

9 Поляхов, Н. Д. , Приходько, И. А. , Рубцов, И. А. , Швыров, И. В. Оптимизация распределения потоков мощности в энергосистеме с помощью генетических алгоритмов // *Современные проблемы науки и образования*. – 2012. – № 3. – С. 170.

10 Анисимов, Т. С. Регулирование напряжения в распределительных сетях с помощью теории нечеткой логики // *Введение в энергетику. Материалы I Всероссийской молодежной научно-практической конференции*. – 2014. – С. 33.

REFERENCES

1 Pérez-Andreu, V., Aparicio-Fernández, C., Martínez-Ibernón, A., Vivancos, J.-L. Impact of climate change on heating and cooling energy demand in a residential building in a Mediterranean climate. *Energy*. 2018. – Vol. 165. – P. 63–74.

2 Kim, S.-H., Lee, S., Han, S.-Y., Kim, J.-H. Scenario analysis for GHG emission reduction potential of the building sector for new city in South Korea. *Energies*. – Oct. 2020. – Vol. 13. № 20. – P. 55–14.

3 Dominković, D., Dobravec, V., Jiang, Y., Nielsen, P., Krajačić, G. Modelling smart energy systems in tropical regions. *Energy*. – Jul. 2018. – Vol. 155. P. – 592–609.

4 Vahidinasab, V., Ardalani, C., Mohammadi-Ivatloo, B., Giaouris, D., Walker, S. L. Active building as an energy system: Concept, challenges, and outlook. *IEEE Access*. – 2021. – Vol. 9. – P. 58009–58024.

5 Bourdeau, M., Zhai, X. Q., Nefzaoui, E., Guo, X., Chatellier, P. Modeling and forecasting building energy consumption: A review of data-driven techniques. *Sustainable Cities and Society*. – Jul., 2019. – Vol. 48. № 101–533.

6 Li, W., Logenthiran, T., Phan, V.-T., Woo, W. L. Implemented IoT-based self-learning home management system (SHMS) for Singapore. *IEEE Internet of Things Journal*. – Jun. 2018/–Vol. 5. – № 3. – P. 2212–2219.

7 Ayuev, B. I., Davydov, V. V., Neuimin, V. G. Analiz effektivnosti vychislitel'nykh modelei dlya rascheta ustoichivyykh rezhimov elektricheskikh sistem [Analysis of the efficiency of computational models for calculating steady-state modes of electrical systems]. *Elektrichestvo*. – 2008. – No. 8. – P. 2–14.

8 Ageev, V. A., Dushutin, K. A., Dudin, A. V. Sravnitel'nyi analiz metodov rascheta rezhimov elektricheskikh setei [Comparative analysis of methods for calculating electrical network modes]. *Sel'skaya mekhanika*. – 2018. – No. 1. – P. 30–33.

9 Polyakhov, N. D., Prikhodko, I. A., Rubtsov, I. A., Shvyrov, I. V. Optimizatsiya raspredeleniya potoka moshchnosti v energosisteme s ispol'zovaniem geneticheskikh algoritmov [Optimization of power flow distribution in the power system using genetic algorithms]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*. – 2012. – No. 3. – P. 170.

10 Anisimov, T. S. Reguliatsiya napriazheniia v raspredelitel'nykh setiakh s ispol'zovaniem teorii nechetkoi logiki [Voltage regulation in distribution networks using fuzzy logic theory]. *Vvedenie v energetiku. Trudy I Vserossiiskoi molodezhnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. – 2014. – P. 33.

Поступило в редакцию 20.07.25

Поступило с исправлениями 25.07.25

Принято в печать 08.09.25

A. B. Bekbayev¹, *R. S. Akhambayev², S. A. Minazhova³,

A. D. Berdimurat⁴, N. Zh. Nalibayev⁵

^{1,2,3}К. И. Satpayev Kazakh National Technical Research University. Republic of Kazakhstan, Almaty.

^{4,5}«QazNRG Group» LLP. Republic of Kazakhstan, Almaty

Received 20.07.25

Received in revised form 25.07.25

Accepted for publication 08.09.25

BUILDING ENERGY MANAGEMENT FOR SUSTAINABILITY WITH INTEGRATED RENEWABLE ENERGY SOURCES

In the context of global climate change and the rapid growth of energy consumption, there is an increasing need to improve the energy efficiency of buildings and introduce sustainable energy solutions. This paper is devoted to the issues of energy exploitation of buildings with an emphasis on ensuring their sustainability through the integration of renewable energy sources (RES). Modern technologies and strategies for energy management are considered, including the use of solar panels, heat pumps, wind turbines and energy storage systems. Special attention is paid to intelligent building management systems (IBMS), which optimize resource consumption and minimize the carbon footprint. The examples of successful integration of renewable energy sources into residential and commercial facilities are analyzed, and recommendations are given on the design and operation of buildings taking into account the requirements of sustainable development. The work is aimed at supporting the transition to a low-carbon economy and increasing the environmental sustainability of the urban environment.

Due to the problems caused by climate change, the popularity of eco-friendly buildings is growing. Moreover, it is becoming necessary to ensure sustainable development through the management of new and renewable energy sources. In this regard, this article describes a proposal and empirical demonstration of a method for optimizing the energy supply of buildings integrated into renewable energy sources using photovoltaic systems (FVS) and energy storage systems (ESS).

Key words: Energy management of buildings, renewable energy sources, energy efficiency, intelligent control systems, zero-energy building, environmental sustainability, energy saving, renewable energy integration.

A. B. Бекбаев¹, *Р. С. Ахамбаев², С. А. Минажова³,

A. Д. Бердімұрат⁴, Н. Ж. Налибаев⁵

^{1,2,3}Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті. Қазақстан Республикасы, Алматы қ;

^{4,5}«QazNRG Group» ЖШС. Қазақстан Республикасы, Алматы қ.

20.07.25 ж. баспаға түсті.

25.07.25 ж. түзетулерімен түсті.

08.09.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

ЖАҢАРТЫЛАТЫН ЭНЕРГИЯ КӨЗІМЕН ТҰРАҚТЫ ТҮРЛІЛІК ҮШІН ЭНЕРГИЯНЫ БАСҚАРУДЫ ҚҰРУ

Жаһандық климаттың өзгеруі және энергия тұтынудың жылдам өсуі жағдайында ғимараттардың энергия тиімділігін арттыру және тұрақты энергетикалық шешімдерді енгізу қажеттілігі артуда. Бұл құжат жаңартылатын энергия көздерін (ЖЭК) біріктіру арқылы олардың тұрақтылығын қамтамасыз етуге баса назар аудара отырып, ғимараттардың энергия менеджментіне назар аударады. Энергияны басқарудың заманауи технологиялары мен стратегиялары, соның ішінде күн батареяларын, жылу сорғыларын, жел турбиналарын және энергия сақтау жүйелерін пайдалану қарастырылған. Ғимаратты басқарудың интеллектуалды жүйелеріне (ФБИЖ) ерекше назар аударылады, бұл ресурстарды тұтынуды оңтайландыруға және көміртегі ізін азайтуға мүмкіндік береді. ЖЭК-ті тұрғын және коммерциялық ғимараттарға сәтті біріктіру мысалдары талданып, тұрақты даму талаптарын ескере отырып, ғимараттарды жобалау және пайдалану бойынша ұсыныстар берілген. Жұмыс төмен көміртектегі экономикаға көшуді қолдауға және қалалық ортаның экологиялық тұрақтылығын арттыруға бағытталған. Климаттың өзгеруінен туындаған қиындықтарға байланысты жасыл ғимараттардың танымалдығы артып келеді. Сонымен қатар, жаңа және жаңартылатын энергия көздерін басқару арқылы тұрақты дамуды қамтамасыз ету қажет болып отыр. Осыған байланысты бұл жұмыста фотоэлектрлік жүйелер (ФЖ) және энергия сақтау жүйелері (ЭСЖ) арқылы жаңартылатын энергия көздерімен біріктірілген ғимараттарды энергиямен қамтамасыз етуді оңтайландыру әдісінің ұсынысы мен эмпирикалық көрсеткіші сипатталған.

Кілтті сөздер: Ғимараттарды энергиямен басқару, жаңартылатын энергия көздері, энергия тиімділігі, интеллектуалды басқару жүйелері, нөлдік энергия тұтынатын ғимарат, экологиялық тұрақтылық, энергия үнемдеу, жаңартылатын энергияны біріктіру.

SRSTI 44.01.94

<https://doi.org/10.48081/UFNH5611>

**A. Biloshchytskyi^{1*}, O. Kuchanskyi², Y. Andrashko³,
S. Biloshchytska⁴, A. Medetbek⁵**

^{1,2,4,5}, Astana IT University, Republic of Kazakhstan, Astana

³Uzhhorod National University, Ukraine, Uzhhorod

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9548-1959>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1277-8031>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2306-8377>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0856-5474>

⁵ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-7192-0360>

*e-mail: a.b@astanait.edu.kz

PREDICTABILITY OF MINING WASTEWATER POLLUTION BASED ON FRACTAL TIME SERIES ANALYSIS

Pollution of water resources by heavy metals, especially in areas of ore mining and processing, leads to a deterioration in the quality of life and health of the population. The greatest degree of pollution is associated with the development of deposits of copper, zinc and lead. Within the framework of this study, a fractal R/S analysis of the time series of wastewater indicators (turbidity, electrical conductivity, flow rate and pH) selected at the site of the Sayak ore district (Republic of Kazakhstan) was performed. A substantial increase in flow was noticed from July 10 to July 15, 2024, and an increase in electrical conductivity from July 4 to July 26, 2024, although without exceeding critical levels. The Hurst exponent for electrical conductivity exceeds 0.56, indicating the presence of long-term memory and the stability of the process. Minor variations in turbidity indicate no serious harm to the environment. However, the data are limited and do not allow for an assessment of all deposits in the region, making it difficult to draw conclusions about the impact on the environmental safety of the Balkhash urban region. Despite the high risk of chronic diseases in the area, the results confirm that fractal analysis can serve as a useful indicator of environmental conditions and a basis for monitoring systems.

Keywords: time series analysis, R/S analysis, Hurst exponent, mining wastewater, environmental monitoring.

Introduction

It is well known that the mining and processing of metal ores is one of the main causes of environmental degradation [1]. Ores are extracted using both open-pit (up to 100 meters deep) and underground methods, depending on the location of the deposits. A significant amount of waste remains, as the proportion of ore in the extracted material is low. Some pollutants enter water bodies used by the local population. The proximity of such facilities to water sources poses a serious threat to safety and quality of life. Water pollution may be organic, inorganic, pathogenic, thermal, or radioactive [2]. This complicates water use in households, agriculture, and disrupts biochemical processes in the soil [3]. The problem is particularly relevant for urban agglomerations located near mining regions. In Kazakhstan, this includes the Northern Balkhash region (southern Karaganda oblast), where the Sayak ore district is located, containing a dozen high-quality deposits.

The region around Lake Balkhash has been experiencing significant environmental difficulties since the 1970s. Excessive use of water resources for mining activities has caused the drying up of lake systems: only 5 out of 16 have survived, and about a third of the Balkhash River basin has dried up [4]. Each year, more than 70 tons of copper and around 60 tons of zinc and lead settled into lake [5]. The water is also contaminated with petroleum products and fluoride compounds. Additional impact comes from wastewater discharged by mining enterprises in the People's Republic of China.

In study [6], the example of Indian water bodies, a statistical method for assessing water quality was developed based on the Water quality Index (WQI) and the use of fractal analysis (calculation of the Hurst index). However, such assessments, suitable for drinking water sources, require adjustment when analyzing wastewater from ore mining. To evaluate the long-term memory of time series, methods such as Rescaled Range Analysis (R/S-analysis) [7] and Detrended Fluctuation Analysis [8] are applied. Water quality indicators are determined according to WHO/EPA standards [9], and sampling procedures are described in [10]. Study [11] demonstrates the persistence of Hurst exponent values for hydrological variables before and after deseasonalization, which is important for forecasting. However, it focused on open water bodies (Little River and Walker Branch (Tennessee, USA), while wastewater from mining sites may have distinct characteristics. Several studies [12] have revealed fractal behavior and persistent concentrations of chemical components in mine water flow. As shown in [13, 14], some water quality parameters exhibit both short-term and long-term predictability.

Study [15] examined the quality of drinking water using turbidity as an indicator – a measure of transparency loss due to the presence of suspended particles. Turbidity serves as an important indicator of changes in water quality. When persistent changes in this parameter are observed, it becomes possible to

forecast the future state of the water. In the present study, turbidity and electrical conductivity of wastewater generated during metal ore mining are analyzed. Although this water is not used for drinking, its infiltration into groundwater and surface water bodies (e.g., the Balkhash basin) may pose environmental risks and threaten public health. If pollutants exhibit long-term persistence, their concentration can be monitored and predicted. However, in the case of random or antipersistent fluctuations, such predictability is lost, indicating potential violations of technological standards.

Fractal analysis has a number of significant advantages over traditional methods in processing environmental monitoring data, especially in the study of time series of environmental pollution (water, air and soil resources). It is more robust to noise and capable of extracting the underlying structure of a signal even in the absence of clear patterns. Unlike classical methods, fractal analysis enables the development of predictive models for ecosystems with unstable or cyclical dynamics and serves as a foundation for machine learning and neural networks, especially in anomaly detection.

The goal of this research is to examine persistence over time in time series of polluted water, which affects environmental safety and quality of life in areas near mining regions. The Balkhash urban region, particularly its northern part and the Sayak ore district, was selected as the study area. The long-term persistence of pollutant concentrations indicates the potential for forecasting and controlling water quality. This is important for ensuring environmental safety and sustainable development in urban agglomerations, especially those located near mining areas. Research Objectives:

To apply fractal analysis to time series of pollution indicators (turbidity, electrical conductivity, pH, and flow) to calculate the Hurst exponent and identify long-term memory.

To investigate the values of the Hurst index according to the main parameters for assessing the degree of wastewater pollution in the Sayak ore region.

Materials and methods

A discrete time series of wastewater indicators (turbidity, flow, electrical conductivity, pH, etc.) is considered, with values recorded by the corresponding sensors at specific time intervals $t_1, t_2, \dots, t_n$, where t_1 be the initial time point, then the time series can be represented as [16]:

$$R = (r(t_1), r(t_2), \dots, r(t_n)).$$

Based on the original time series R a family of cumulative time series $R^h = (r(t_1), r(t_2), \dots, r(t_h))$, $h = \overline{3, n}$ is constructed to analyze the aggregated behavior of the observed data over time and [7, 17]:

where $\overline{R}^h$ is the arithmetic mean of a time series R^h ,

$$\rho(h, s) = \sum_{j=1}^s (r(t_j) - \overline{R}^h), h = \overline{3, n}, s = \overline{3, n},$$

where ρ h, s is the deviation from the arithmetic mean,

$$F_h = \max_{s=1, h} \rho(h, s) - \min_{s=1, h} \rho(h, s),$$

where F_h – range,

$$\sigma_h = \sqrt{\frac{1}{h} \sum_{j=1}^s (q(t_j) - \overline{Q}^h)^2}, h = \overline{3, n},$$

where σ_h is the standard deviation of a time series.

Accordingly, the following equation can be derived:

$$\lg\left(\frac{F_h}{\sigma_h}\right) = H(R^h) \cdot \lg(h) + \lg(\delta), h = \overline{3, n}$$

where $H(R^h)$ is the Hurst exponent, as the coefficient of the independent variable, is calculated using the least squares method.

The fractal dimension D of the time series R is calculated using the following formula [7] $D = 2 - H$.

It indicates the extent to which the fractal occupies space when the observation scale is reduced. Based on the fractal dimension D , a predictability index P can be calculated [6] $P = 2|D - 1.5|$.

The value of P increases with a decrease or increase in the fractal dimension of D relative to the value of 1.5. At $D < 1.5$, stability is recorded in the structure of the time series. At $D < 1.5$, the time series R also demonstrates constancy. If P tends to zero, it can be concluded that the time series is random or close to it. The following formula is used to establish a threshold value that makes it possible to distinguish between a stable time series and a random one [18]:

$$H_h^T = \sqrt{\frac{2}{\pi(h-1)}} \sum_{i=1}^{h-1} \sqrt{\frac{h-i}{i}},$$

where H_h^T is the theoretical threshold value for identifying the boundary between random and persistent time series.

Thus, after determining the value of the Hurst indicator, the following interpretation of the results of the analysis of the time series of wastewater discharges can be presented:

1 $H_h^T < H(R^h) \leq 1$. This may indicate the presence of long-term memory or persistence in the time series. In the case of turbidity or electrical conductivity indicators, this means that high levels of pollution tend to persist or reappear after a temporary decrease. At the same time, the overall trend remains stable, which allows the application of trend-based forecasting methods. For monitoring systems, this is important because persistence signals the stability, predictability, and controllability of water discharges from ore mining facilities.

2 $0.5 \leq H(R^h) \leq H_h^T$. This indicates the random nature of the time series. In the context of water discharge indicators, it suggests unstable pollution levels that cannot be reliably predicted or controlled. Such a situation may point to disruptions in technological processes, insufficient treatment, or accidental releases. This is especially concerning if the time series previously exhibited persistent behavior.

3 $0 \leq H(R^h) < 0.5$ This indicates ergodicity and anti-persistence in the time series. In the context of water discharge indicators, it means that pollution levels tend to decrease after high values or increase after low ones. Moreover, the trends change more rapidly than in random time series.

The Hurst indicator makes it possible to identify the presence of a long-term relationship in the time series of water flow indicators, which is important for pollution control systems. The present study focuses on process water discharges from mining enterprises; however, this approach can also be used to analyze the quality of drinking water.

Results and Discussion

Data on water discharges from one of the facilities located in the Sayak ore district were used in this study. The data were provided by a private mining company under confidentiality conditions. The facility has been operating for over 50 years and specializes in copper ore extraction. The region is located about 200 km from the city of Balkhash. Three types of groundwater serve as sources of water supply: porous aquifers in loose sediments (with a mineralization of up to 3 g/l), fractured-porous horizons at a depth of up to 50 m and fractured-vein horizons at a depth of 50-60 m. The chemical composition of groundwater is relatively stable, it is dominated by sulfate compounds, and the water is characterized by high hardness (the pH value varies between 6.9–8.5). The analysis covered the period from May 23, 2024, to August 28, 2024, with measurements taken every 20 minutes, resulting in a total of 6,385 observations. The studied parameters included turbidity (NTU), electrical conductivity (in Siemens), flow rate (in m³/s), and pH. However, the pH data were insufficient for reliable analysis. Turbidity reflected the concentration of suspended particles, electrical conductivity indicated the ionic content of the water, and flow was defined as the volume of water passing through a given area per unit time. A sample of the data and Water Quality Index (WQI) estimates is provided in Table 1 [17]. The full dataset is available at [19].

A fractal analysis of time series data on water discharge indicators was conducted for a facility located in the Sayak ore district. Based on R/S-analysis, Hurst exponents were calculated for electrical conductivity, turbidity, and flow rate – both for the entire observation period and for a shorter period characterized by abrupt changes in these parameters. Additionally, Water Quality Index (WQI) values and the predictability index were determined. As shown in Figure 1, a sharp increase in water electrical conductivity (red line) was observed in July 2024, whereas during the rest of the observation period, the values remained close to zero due to the absence of significant flow. From July 10 to July 15, flow rate (green line) increased sharply, while electrical conductivity had already begun to rise on July 4 and remained elevated until July 26. The significant increase in flow during July 10–15, 2024, may be attributed to both industrial activities and weather conditions, heavy rainfall occurred during this period in the southern part of the Karaganda region (Northern Balkhash region) [20]. The increase in flow was accompanied by the discharge of a large volume of water with high electrical conductivity, while turbidity levels remained almost unchanged. According to [9], even the peak electrical conductivity values in the studied dataset do not pose a serious environmental threat to the region.

Table 1 – Descriptive statistics of time series for wastewater discharge indicators from a metal ore mining facility

Indicator	Turbidity (NTU)	Electrical conductivity (S/m)	Flow Rate (m ³ /s)	pH	WQI
Number of observations	6386	6386	6386	55	6386
Mean	7.23	81.95	1.42	5.86	0.20
Std	1.72	206.70	3.82	0.70	0.52
Min	0.00	0.00	0.00	2.17	0.00
Max	8.98	2422.73	20.85	6.62	6.06

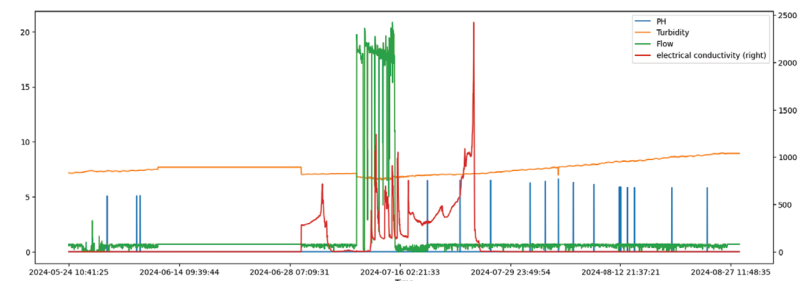


Figure 1 – Time series of water discharge indicator values (flow rate, electrical conductivity, turbidity, and pH level) were recorded at one of the metal ore mining facilities in the Sayak ore district during the period from May 23, 2024, to August 28, 2024.

The Hurst exponent value for the time series of electrical conductivity during the period from May 23, 2024, to August 28, 2024, is $H_1(R^{6386}) \approx 0.59$. For the period from July 4, 2024, to July 26, 2024, the Hurst exponent is $H_2(R^{1583}) \approx 0.51$. According to the study [18] $H_1^T(R^{6386}) < 0.5065$, and $H_2^T(R^{1583}) < 0.5141$. This means that the time series of electrical conductivity for both time periods are persistent, since $H_1(R^{6386}) < H_1^T(R^{6386})$ and $H_2(R^{1583}) < H_2^T(R^{1583})$. Based on the dataset, Water Quality Index (WQI) values were calculated, indicating persistence in the corresponding time series. At the same time, turbidity and flow rate exhibited anti-persistent behavior: the flow rate fluctuated sharply, particularly between July 10 and July 15, 2024, while turbidity showed only minor variations, reflecting short-term fluctuations.

The analysis showed that the time series of electrical conductivity in water discharges from the metal ore mining facility in the Sayak district exhibit long-term memory properties. This indicates the stability, predictability, and controllability of this parameter. Considering the regulatory limits for electrical conductivity [9], it can be concluded that the facility complies with the requirements for water treatment and settling prior to discharge.

Funding

This research was funded by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan within the project BR21882258 «Development of Intelligent Information and Communication Systems Complex for Environmental Emission Monitoring to Make Decisions on Carbon Neutrality».

Conclusions

This research examined the time series of discharges of treated wastewater from a metal ore mining enterprise in the Sayak ore region (Kazakhstan) for the period from May 23 to August 28, 2024. Using the fractal R/S analysis method,

Hurst indices were determined for parameters such as turbidity, electrical conductivity, and flow velocity. The pH analysis proved impossible due to insufficient data.

In the period from July 10 to July 15, a sharp increase in runoff was recorded, and from July 4 to July 26, an increase in electrical conductivity was observed due to intense precipitation. Despite the fact that the values of electrical conductivity did not reach critical levels, their increase may indicate the likelihood of contamination at high concentrations. The Hurst index for electrical conductivity (0.56–0.59) indicates the presence of stability and long-term memory, which characterizes the process as predictable. The Water Quality Index (WQI) also indicates a stable condition. Turbidity values remained in the range of 0.43–0.49, reflecting their unstable and stable nature, which does not pose an environmental threat.

Thus, the process of change in electrical conductivity at the studied facility appears to be controllable, with limited impact on the surrounding environment. However, potential risks from other facilities in the region should be considered, as previous cases of heavy metal concentrations exceeding acceptable levels have been recorded in the waters of Lake Balkhash. This highlights the relevance of fractal analysis as an effective tool for environmental monitoring and for protecting public health.

REFERENCES

- 1 **Dudka, S., Adriano, D. C.** Environmental Impacts of Metal Ore Mining and Processing: A Review [Text] // Journal of Environmental Quality – 1997 – <https://doi.org/10.2134/jeq1997.00472425002600030003x>
- 2 **Madhav, S., Ahamad, A., Singh, A., Sharma, S., Singh, P.** Water Pollutants: Sources and Impact on the Environment and Human Health [Text] // Sensors in Water Pollutants Monitoring: Role of Material – 2019 – https://doi.org/10.1007/978-981-15-0671-0_4
- 3 **Hancock, P. J., Boulton, A. J., Humphreys, W. F.** Aquifers and hyporheic zones: Towards an ecological understanding of groundwater [Text] // Hydrogeology Journal – 2005 – 13(1), 98–111.
- 4 **Le Sourd, G., Rizzolio, D.** United Nations Environment Programme – Lake Balkhash. [Text] // UNEP Global Resource Information Database 2004. Available online: <https://web.archive.org/web/20110718164918/http://www.grid.unep.ch/activities/sustainable/balkhash/> (Accessed on 16 May 2025).
- 5 International Lake Environment Committee. Lake Balkhash [Text] // World Lakes Database. Available online: <https://web.archive.org/web/20110805105000/http://www.ilec.or.jp/database/asi/asi-54.html> (accessed on 16 May 2025).

- 6 **Parmar, K. S., Bhardwaj, R.** Water quality index and fractal dimension analysis of water parameters [Text] // Int. J. Environ. Sci. Technol. 2013, 10, 151–164. doi: 10.1007/s13762-012-0086-y
- 7 **Peters, E. E.** Fractal market analysis: applying chaos theory to investment and economics [Text] // John Wiley & Sons Inc, 1994. 336.
- 8 **Thompson, J. R., Wilson, J. R.** Multifractal detrended fluctuation analysis: Practical applications to financial time series [Text] // Comput. Simul., 2016, 126, 63–88, <https://doi.org/10.1016/j.matcom.2016.03.003>.
- 9 World Health Organization. International standards for drinking-water, 3rd edition [Text] // Available online: <https://www.who.int/publications/i/item/9241540249> (Accessed on 06 October 2024).
- 10 **Rice, E. W., Baird, R. B., Eaton A. D.** Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 23rd Edition [Текст экстр] // American Water Works Association (AWWA, WEF and APHA), New York – 2017, 1796.
- 11 **Koirala, S. R., Gentry, R. W., Perfect, E., Mulholland, P. J., Schwartz, J. S.** Hurst Analysis of Hydrologic and Water Quality Time Series [Text] // Journal of Hydrologic Engineering – 2010 – 16, 9. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000357](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000357)
- 12 **Zhou, X., Persaud, N., Wang, H.** Scale invariance of daily runoff time series in agricultural watersheds [Text] // Hydrol. Earth Syst. Sci – 2006, 10(1), 79–91.
- 13 **Kirchner, J. W., Feng, X. H., Neal, C.** Fractal stream chemistry and its implications for contaminant transport in catchments [Text] // Nature 2000, 403(6769), 524–527.
- 14 **Shang, P. J., Kamae, S.** Fractal nature of time series in the sediment transport phenomenon [Text] // Chaos Solitons Fractals – 2005 – 26(3), 997–1007.
- 15 **Prada, D. A., Herrera-Jaramillo, Y. A., Ortega, J., Gomes, J.** Fractional Brownian motion and Hurst coefficient in drinking water turbidity analysis [Text] // Journal of Physics: Conference Series, XV Applied Mathematics Meeting and XII Statistics Meeting – 2020, 1645, 012004. doi:10.1088/1742-6596/1645/1/012004
- 16 **Biloshchytskyi, A., Kuchanskyi, O., Neftissov, A., Andrashko, Y.; Biloshchytska, S.; Kazambayev, I.** Fractal Analysis of Mining Wastewater Time Series Parameters: Balkhash Urban Region and Sayak Ore District [Text] // Urban Sci – 2024, 8, 200. <https://doi.org/10.3390/urbansci8040200>
- 17 **Biloshchytskyi, A., Neftissov, A., Kuchanskyi, O., Andrashko, Y., Biloshchytska, S., Mukhatayev, A., Kazambayev, I.** Fractal Analysis of Air Pollution Time Series in Urban Areas in Astana, Republic of Kazakhstan [Text] // Urban Sci. – 2024 – 8, 131. <https://doi.org/10.3390/urbansci8030131>
- 18 **Anis, A., Lloyd, E.** The expected value of the adjusted rescaled Hurst Range of independent normal summands [Text] // Biometrika – 1976 – 63, 111–116.

19 Data on Water Discharges from Copper Ore Extraction in the Sayak Ore Basin, 2024. doi: <https://doi.org/10.5281/zenodo.13899489>

20 Meteorological and hydrological databases. Republic of Kazakhstan, KAZHIDROMET [Text] // Available online: https://www.kazhydromet.kz/ru/meteo_db (Accessed on 07 May 2025).

Received 29.08.25

Received in revised form 03.09.25

Accepted for publication 05.09.25

А. Белошицкий^{1*}, О. Кучанский², Ю. Андрашко³,
С. Белошицкая⁴, А. Медетбек⁵

^{1,2,4,5}Астана ІТ университеті, Қазақстан Республикасы, Астана қ

³Ужгород ұлттық университеті, Украина, Ужгород

29.08.25 ж. баспаға түсті.

03.09.25 ж. түзетулерімен түсті.

05.09.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

ФРАКТАЛДЫҚ УАҚЫТ ТІЗІМЕСІН ТАЛДАУ НЕГІЗІНДЕГІ ТАУ-КЕН АЗАМАТТАРЫНЫҢ АҒЫНДЫ СУЛАРЫНЫҢ ЛАСТАНУЫН БОЛЖАУ

Тау-кен өндірісі мен кен байыту нысандарының жанында су көздерінің ауыр металдармен ластануы халықтың денсаулығына кері әсер етіп, өмір сүру сапасының төмендеуіне әкелуде. Ең ауыр ластану Си, Zn және Pb алумен байланысты. Бұл зерттеу Саяқ кенді ауданындағы (Қазақстан Республикасы) ағынды сулардың уақыттық қатары деректеріне (лайлылық, электр өткізгіштік, ағын және рН) фракталдық R/S-талдау жүргізді. Ағынның күрт өсуі 2024 жылғы 10 шілдеден 15 шілдеге дейін және электр өткізгіштіктің 2024 жылғы 4 шілдеден 26 шілдеге дейін ұлғаюы сыни деңгейден аспа да байқалды. Электр өткізгіштіктің Херст көрсеткіші 0,56-дан асады, бұл ұзақ мерзімді жадының болуын және процестің тұрақтылығын көрсетеді. Лайланудың шамалы ауытқуы қоршаған ортаға айтарлықтай зиян келтірмейтінін көрсетеді. Дегенмен, деректер шектеулі және аймақтағы барлық кен орындарын бағалауға мүмкіндік бермейді, бұл Балқаш қалалық аймағының экологиялық қауіпсіздігіне әсері туралы қорытынды жасауды қиындатады. Аудандағы созылмалы аурулардың жоғары қаупіне қарамастан, нәтижелер фракталдық талдау қоршаған орта жағдайларының пайдалы көрсеткіші және мониторинг жүйелері үшін негіз бола алатынын растайды.

Кілтті сөздер: уақыт қатарын талдау, R/S талдау, Херст көрсеткіші, тау-кен ағынды сулары, қоршаған ортаны бақылау.

А. Белошицкий^{1*}, О. Кучанский², Ю. Андрашко³,

С. Белошицкая⁴, А. Медетбек⁵

^{1,2,4,5}Астана ІТ Университет, Республика Казахстан, Астана

³Ужгородский национальный университет, Украина, Ужгород

Поступило в редакцию 29.08.25

Поступило с исправлениями 03.09.25

Принято в печать 05.09.25

ПРОГНОЗИРУЕМОСТЬ ЗАГРЯЗНЕНИЯ СТОЧНЫХ ВОД ГОРНОДОБЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ НА ОСНОВЕ ФРАКТАЛЬНОГО АНАЛИЗА ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ

Загрязнение водных ресурсов тяжелыми металлами, особенно в районах, прилегающих к горнодобывающим и перерабатывающим предприятиям, приводит к ухудшению качества жизни и состояния здоровья населения. Наиболее сильное загрязнение связано с добычей Си, Zn и Pb. В данном исследовании проведен фрактальный R/S-анализ временных рядов данных (мутность, электропроводность, расход и рН) сточных вод с участка Саякского рудного района (Республика Казахстан). Резкое увеличение расхода наблюдалось с 10 по 15 июля 2024 года, а увеличение электропроводности – с 4 по 26 июля 2024 года, хотя и без превышения критических значений. Показатель Херста для электропроводности превышает 0,56, что свидетельствует о наличии долговременной памяти и стабильности процесса. Незначительные колебания мутности свидетельствуют об отсутствии серьезного вреда для окружающей среды. Однако имеющиеся данные ограничены и не позволяют оценить все месторождения в регионе, что затрудняет выводы о влиянии на экологическую безопасность Балхашского городского округа. Несмотря на высокий риск развития хронических заболеваний в этом районе, полученные результаты подтверждают, что фрактальный анализ может служить полезным индикатором состояния окружающей среды и основой для систем мониторинга.

Ключевые слова: анализ временных рядов, R/S-анализ, показатель Хёрста, сточные воды горнодобывающих предприятий, экологический мониторинг.

<https://doi.org/10.48081/CTCB8451>**А. А. Генбач¹, *Д. Ю. Бондарцев²**^{1,2}Алматынський Университет Енергетики и Связи
имени Г. Даукеева, Республика Казахстан, г. Алматы¹ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-3819-4387>²ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8778-7851>*e-mail: d.bondartsev@aes.kz

ОХЛАЖДЕНИЕ ЛОПАТОК ПЕРСПЕКТИВНЫХ ПАРОВЫХ ТУРБИН КИПЯЩИМИ ЖИДКОСТЯМИ

Разработано и исследовано охлаждение кипящим охладителем перспективных паровых турбин, работающих выше стандартных сверхкритических температурах и давлениях. Изучена система, работающая по схеме тепловой трубы, причем к капиллярному потенциалу добавлен массовый. Произведен расчет испарительной и конденсационной частей. Разработаны установки для оптических методов исследования динамики развития паровой и жидкостной фаз. Рассмотрена динамика процессов роста и разрушения в капиллярно-пористой структуре с помощью оптических методов. Представлены кинограммы и голографические интерферограммы процессов теплопередачи для различных фитилей, тепловых нагрузок, избытка жидкости с расчетом внутренних характеристик кипения, выбросом капель жидкости из структуры. Возможность разделения общей энергии при зарождении парового зародыша является важной задачей борьбы с эрозией и кавитацией. Показана имитация аварийной ситуации за счет снижения расхода охладителя до его минимального значения. Применение структур с подобранным гидравлическим диаметром (0.15×10^{-3} м) и толщиной сетчатого слоя (0.75×10^{-3} м) обеспечивает необходимую интенсивность теплоотвода при минимальном сопротивлении потоку. Предложенная технология является особенно привлекательной для замены дорогостоящих жаропрочных сплавов аустенитного класса, снижая стоимость и повышая надежность и ремонтпригодность оборудования.

Ключевые слова: пузырьковые потоки, кавитация, система охлаждения, диафрагма, сопловые лопатки, пористая среда, голография, скоростная киносъемка.

Введение.

В настоящее время используются котлотурбинные параметры агрегатов выше стандартных сверхкритических [1], в которых требуется высокоинтенсивное охлаждение диафрагмы [2] (см. рис. 1). В современных инженерных системах гидравлические машины тесно связаны с процессами теплообмена. Во время работы насосов [3], турбин и других агрегатов жидкость нагревается из-за трения, потерь давления и внутренних утечек, что требует обязательного охлаждения.

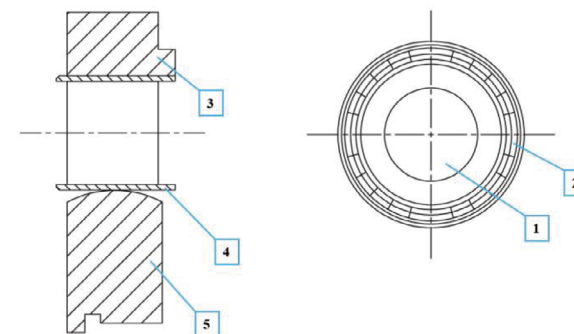


Рисунок – 1 – Диафрагма: 1 – ротор, 2 – сопла, 3 – обод, 4 – лента, 5 – тело

Особенно важным становится это в энергетике - например, в атомных электростанциях, где турбонасосы перекачивают воду при высоких температурах [4], близких к кипению. В таких условиях возможно образование паровых пузырьков, что приводит к кавитации [5]. Это не только снижает эффективность работы машины, но и вызывает повреждения деталей [6]. Таким образом, кипение, охлаждение и гидродинамика образуют неразрывную технологическую цепочку, критичную для надежности и безопасности машин и оборудования. Для повышения тепловой эффективности электростанций стали применяться тепловые трубы, которые в большей степени выгоднее иных систем охлаждения. Система охлаждения лопаток показана на рисунке 2.

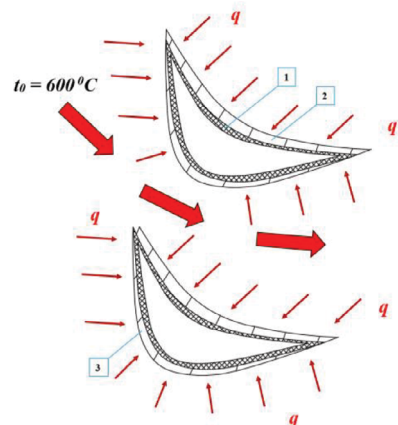


Рисунок – 2 – Охлаждаемые сопловые лопатки:

1 – фитиль, 2 – внутренняя лопатка,

3 – наружная лопатка

Разделение общей энергии в случае генерации пузырька пара представлено на рис. 3 [7]. Визуализацию процессов предлагается произвести на установках для оптических методов исследования, рассматриваемых в данной статье.

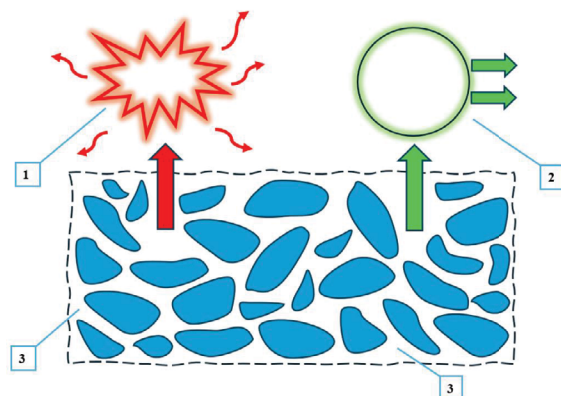


Рисунок – 3 – Разделение общей энергии при рождении парового зародыша: 1 – энергия тепловой волны; 2 – энергия сжатого парового потока; 3 – зона кипение в порах структуры

Последние разработки и будущие направления в визуализации потоков были рассмотрены авторами [8]. Авторы отмечают, что за последние несколько десятилетий достижения в области экспериментальных методов, технологий визуализации и вычислительных методов значительно расширили возможности наблюдения, от классических методов до более передовых подходов, таких как высокоскоростная визуализация, лазерно-индуцированная флуоресценция и цифровая голография.

В данной работе для исследования процессов парообразования методом голографической интерферометрии собирался интерферометр, с гелиево-неоновым лазером ЛГ-38.

Авторами [9] проводится разработка метода диагностики переходных режимов кипения на основе флуктуаций температуры теплоотдающей поверхности Тст. с помощи дискретного вейвлет – преобразования взамен традиционном преобразованию Фурье для получения амплитудно-частотных характеристик флуктуаций температуры и диагностирования смены режима теплообмена.

Для настоящего исследования представляет интерес взаимосвязь предельного состояния капиллярно-пористой покрытия и кризиса теплообмена в капиллярно-пористой структуре при смене режима теплообмена, что позволит в режиме реального времени создавать систему диагностики покрытий [7] и структур (ϕ' , $\phi'_{кр.}$).

В статье предлагается рассмотреть механизмы возникновения, развития и эволюции многофазных потоков в кипящей жидкости.

Материалы и методы.

Для визуализации процессов тепломассопереноса в пористой системе охлаждения методом фотографирования, скоростной киносъёмки и голографической интерферометрии теплообменная система выполняется из алундовой трубы с наружным диаметром 21×10^{-3} м. Применительно к энергоустановкам используются одно-, двух- и трехслойные сетки с ячейками: 0.4 , 0.14×0.4 , $0.08 \times 0.14 \times 0.4$. Тепловым источником служит галоидная кварцевая лампа типа КГ 220-1000-3 (см. рис. 4, поз. 8), расположенная внутри трубы. Основные параметры лампы: напряжение – 220 В; мощность – 1000 Вт; световой поток – 26000 лм; светоотдача – 26 лм/Вт; полная длина – 180×10^{-3} м.

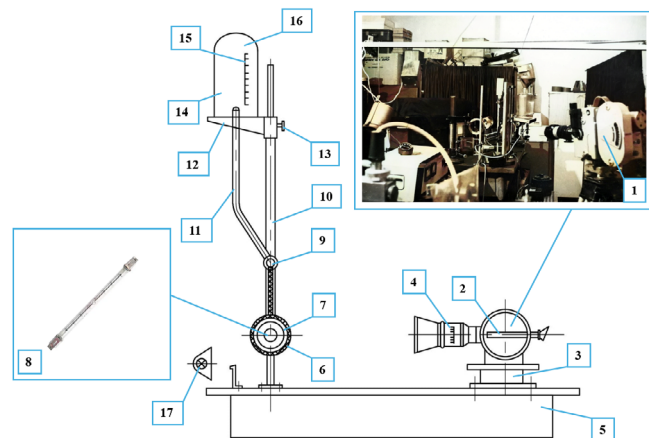


Рисунок – 4 – Схема стэнда для киносъемки

На рис. 4 приняты обозначения: 1 – камера (в масштабе представлен общий вид стэнда), 2 – визир, 3 – штатив, 4 – объектив, 5 – плита, 6 – пористая структура, 7 – алундовая трубка, 8 – лампа КГ-220-1000-3, 9 – артерия, 10 – штатив, 11 – трубка, 12 – кронштейн, 13 – стопорный винт, 14 – вода, 15 – шкала, 16 – бак, 17 – прожектор.

Свет от лампы просвечивает стенку алундовой трубы. Яркость свечения стенки достаточная для фотографирования и скоростной киносъемки на пленке чувствительностью 350...700 единиц ГОСТа. Тепловая нагрузка регулируется напряжением, подаваемым на электроды лампы через ЛАТР-9А, и замеряется ваттметром типа Д539 кл. 0.5.

Наблюдение проводится при следующих удельных тепловых потоках: 4×10^4 Вт/м²; 6.7×10^4 Вт/м²; 9.4×10^4 Вт/м² и 12×10^4 Вт/м², а также для промежуточных значений q . Исследуются критические нагрузки, фотографируются динамические режимы работы системы в экстремальных условиях, когда прекращается доступ жидкости до полного пересыхания структуры, а затем жидкость вновь подается в артерию. Для структуры вида 0.14×0.4 изучается подвод жидкости против действия гравитационных сил.

Съемка осуществляется после наступления стабильного теплового режима, что обычно занимает 5...7 минут. Расход охлаждающей жидкости принимается оптимальным. В некоторых случаях расход воды регулируется так, чтобы капли не было.

Визуальные наблюдения процессов тепломассопереноса производятся методом скоростной киносъемки камерой СКС-1М (см. рис. 4, поз. 1). Фото и киносъемка также осуществляются с помощью фотоаппарата «Зенит»

(см. рис. 5, а) и киноаппаратов «Красногорск» (см. рис. 5, б) и «Киев-16с» (см. рис. 5, в).



Рисунок – 5 – Оборудования для фото и киносъемки

В качестве объективов используются: И-61Л (фокусное расстояние $f = 50 \times 10^{-3}$ м; светосила $d = 1:28$, 10-11 ($f = 135$, $d = 1:4$), Вега-7 ($f = 50$, $d = 1:2$) и РО ($f = 50$, $d = 1:2$).

Для съемки применяется кино- и фотопленка типа А-2 шириной 16×10^{-3} м и номинальной чувствительностью 180...350 единиц ГОСТа. Время экспонирования составляет от 1/100 до 1/1000 секунды, диафрагма – от 2.8 до 16. В отдельных случаях устанавливается нейтральный 4-кратный фильтр, что позволяет при небольших скоростях киносъемки и срабатывания затвора фотоаппарата вести съемку с максимально открытой диафрагмой.

В качестве исходного параметра для набора частоты кадров и диафрагмы кино- и фото-съемочной аппаратуры служит средняя продолжительность «жизни» парового пузыря, которая в зависимости от величины q предполагается равной 1/50...1/4000 секунды. Фотографирование производится с расстояния 0.4...0.7 м.

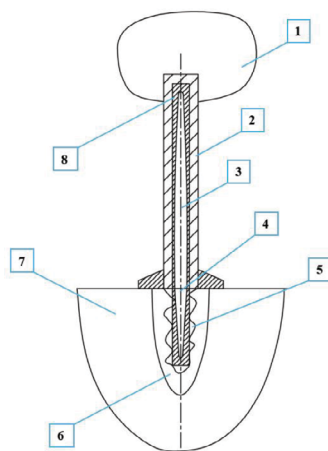
Число действующих центров парообразования, отнесенное к единице поверхности нагрева, определяется по формуле:

$$\bar{n} = \left[\frac{\bar{M}}{F} \right] \cdot \frac{[\tau_p + \tau_o]}{\tau_p}.$$

Для определения отрывного диаметра пузыря производится поккадровая обработка пленок. Записываются размеры всех лопнувших пузырей и вычисляются среднее значения. Доверительный интервал при надежности 0.95 не превышает $\pm 20\%$.

Расчет.

Система охлаждения показана на рисунке 6: 1 – диафрагма, 2 – лопатка, 3 – глухие каналы, 4 – каналы охлаждения в диафрагме, 5 – конденсатор, 6 – охладитель (пар), 7 – тело диафрагмы, 8 – фитиль.



Рисинкок – 6 – Охлаждение сопел фитилем

Для расчета принимаем $P_n = 100$ бар, температура насыщения $t_n = 311.97$ °C. Выберем температуру стенки испарителя:

$$t_{ст.исп.} = (5 \dots 10) + t_n = 5 + 311.97 = 316.9 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Тепловой поток $q_n = 105$ Вт/м², тогда коэффициент теплообмена в испарителе:

$$a_n = \frac{q_n}{t_{ст.исп.} - t_n} = 20000, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K}).$$

Число Стэнтона:

$$St_u \cdot Pr_{ж}^{0.6} \cdot N_{\phi}^{0.44} \cdot \left(\frac{F_u}{\varepsilon \cdot F_{\phi}}\right)^{1.16} = 3.3 \cdot \left(\frac{b_r}{b_{опт}}\right)^n \cdot \left(\frac{l_n}{b_r}\right)^n \cdot N_p^{0.23} \cdot Re_n^{-0.9},$$

где $St_u = \frac{\bar{a}_u}{\bar{G}_ж \cdot c_{рж}}$. Удельный расход жидкости:

$$\bar{G}_ж = \rho_ж \cdot \bar{W}_ж = \frac{q_n \cdot F_n}{\varepsilon \cdot r \cdot F_{\phi}} = \frac{100000 \cdot 0.126}{0.7 \cdot 1309400 \cdot 0.0000612} = 223.8, \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с});$$

$$F_u = \pi \cdot d_u \cdot l_u = 3.14 \cdot 0.04 \cdot 1 = 0.126, \text{ м}^2,$$

где $l_u = 1$ м, $\varepsilon = 0.7$;

$$F_{\phi} = \pi \cdot d_{вн} \cdot \delta_{\phi} = 3.14 \cdot 0.026 \cdot 0.00075 = 0.0000613, \text{ м}^2;$$

$$d_{вн} = d_n - 2\delta_{ст} = 0.028 - 2 \cdot 0.001 = 0.026, \text{ м},$$

где $\delta_{ст} = 1 \times 10^{-3}$ м;

$$Pr_{ж} = \frac{\nu_{ж}}{a_{ж}} = \frac{0.1183 \cdot 10^{-6}}{0.1213 \cdot 10^{-6}} = 0.975;$$

$$N_{\phi} = \frac{b_r^2}{k} = \frac{(0.15 \cdot 10^{-3})^2}{1.5 \cdot 10^{-10}} = 150,$$

где $b_r = 0.15 \times 10^{-3}$ м; $k = 1.5 \times 10^{-10}$ м²; $b_{опт} = 0.14 \times 10^{-3}$ м; $n = 4.25$ ($b_r < b_{опт}$);
 $n = -0.43$ ($b_r > b_{опт}$);

$$N_p = \frac{2\sigma}{P_n \cdot b_r} = \frac{2 \cdot 0.011647}{10132500 \cdot 0.15 \cdot 10^{-3}} = 1.53 \cdot 10^{-5};$$

$$\bar{W}_n = \frac{q_n}{r \cdot \rho_n} = \frac{100000}{1309400 \cdot 680.41} = 0.000112, \text{ м}/\text{с};$$

$$Re_n = \frac{2b_r \cdot W_n}{\nu_n} = \frac{2 \cdot (0.15 \cdot 10^{-3}) \cdot 0.000112}{0.000000348} = 0.097.$$

Далее, по найденным значениям из критериального уравнения определяем число Стэнтона:

$$St_u = \frac{3.3 \cdot 1 \cdot \left(\frac{1}{0.15 \cdot 10^{-3}}\right)^{0.75} \cdot (1.53 \cdot 10^{-5})^{0.23} \cdot 0.097^{-0.9}}{0.975^{0.6} \cdot 150^{0.44} \cdot \left(\frac{0.1256}{0.7 \cdot 0.0000612}\right)^{1.16}} = 0.0166.$$

Коэффициента теплообмена из числа St_u (Вт/(м²К)):

$$a_u = St_n \cdot G_{ж} \cdot c_{рж} = 0.0166 \cdot 223.8 \cdot 6273.2 = 23284.6.$$

Расхождение коэффициента теплообмена с принятой величиной составляет 16.42 %. Уточняем $t_{ст.исп.}$:

$$t_{ст.и} = \frac{q_u}{a_u} + t_n = \frac{100000}{23284.64} + 311.9 = 316.3 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Расчет зоны конденсации.

Теплофизические свойства жидкости определяем по:

$$\bar{t}_{ж.к.} = \frac{t_{ст.и} + t_n}{2} = \frac{316.3 + 311.9}{2} = 314.1, \text{ } ^\circ\text{C}.$$

При расчете зоны конденсации за основу берем критериальное уравнение (Шелгинский А.Я.) [10]:

$$St_k \cdot Pr_{ж}^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{F_n^2}{k \cdot F_\phi}\right)^{0.59} \cdot \left(\frac{F_k}{\varepsilon \cdot F_\phi}\right)^{1.17} = C \cdot \tilde{N}_p^n \cdot Ki^{0.4} \cdot Re_R^{-0.9},$$

$$\text{где } St_k = \frac{\bar{a}_k}{G_{ж} \cdot c_{рж}};$$

$$\bar{a}_k = \frac{q_k}{t_n - t_{ст.к}} = \frac{142857.14}{311.9 - 301.9} = 14285.7, \text{ Вт/м}^2\text{К};$$

$$F_n = \pi \cdot R_n^2 = 3.14 \cdot 0.0123^2 = 0.00047, \text{ м}^2;$$

$$R_n = R_{вн} - \delta_\phi = 0.013 - 0.00075 = 0.0123, \text{ м};$$

$$F_k = \pi \cdot d_n \cdot l_k = 3.14 \cdot 0.04 \cdot 1 = 0.0879, \text{ м}^2;$$

$$q_k = \frac{q_n \cdot F_n}{F_k} = \frac{100000 \cdot 0.126}{0.0879} = 142857.1, \text{ Вт/м}^2\text{К};$$

$$\tilde{N}_p = \frac{P_n \cdot R_n}{\sigma} = \frac{10132500 \cdot 0.0123}{0.0112} = 11116167.4.$$

Для $\tilde{N}_p > 1000$ $n = 0.48$; $c = 3 \times 5 \times 10^3$. Критерий Кирпичева:

$$Ki = \frac{r}{c_{рж} (t_n - t_{ст.к})} = \frac{1291100}{6257.7 \cdot 10} = 20.6;$$

$$Re_n = \frac{R_n \cdot W_n}{\nu_n} = \frac{0.0123 \cdot 0.000112}{0.00000035} = 3.9.$$

Далее, по найденным значениям из критериального уравнения определяем число Стэнтона:

$$St_k = \frac{3500 \cdot 11116167.38^{0.48} \cdot 20.63^{0.4} \cdot 3.92^{-0.9}}{0.973^{-1/3} \cdot \left(\frac{0.000471^2}{1.5 \cdot 10^{-10} \cdot 0.0000612}\right)^{0.59} \cdot \left(\frac{0.088}{0.0000612 \cdot 0.7}\right)^{1.17}} = 0.048.$$

$$a_k = St_k \cdot G_{ж} \cdot c_{рж} = 0.048 \cdot 223.8 \cdot 6257.7 = 67337.9, \text{ Вт/м}^2\text{К}.$$

Расхождение a_k составляет 3.7%. Уточняем $t_{ст.исп.}$:

$$t_{ст.к} = \frac{q_k}{\bar{a}_k} + t_n = \frac{142857.1}{67337.9} + 311.97 = 314.1, \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Так как $(t_n - t_{ст.к}) < (5 - 10) \text{ } ^\circ\text{C}$, расчет считаем законченным.

Результаты и обсуждение.

Рассматривая вопрос пузырьковых потоков в современной литературе [1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10] как эффективная форма обсуждения исследования (в разделе «Расчет») особое внимание можно уделить интеграции каналов с кипящей жидкостью внутри полых лопаток с применением капиллярно-пористых структур [7], тепловых труб [2] и открытых двухфазных систем теплоотвода. Эти технологии активно развиваются в смежных областях – в первую очередь в ракетных, авиационных и газотурбинных двигателях, и теперь они постепенно адаптируются к условиям паровых турбин нового поколения, на стационарных стационарных турбинах ТЭС и АЭС.

В разделе «Расчет» авторами предложена замкнутая испарительно-конденсационная система охлаждения сопловых лопаток (рис. 6). Пример расчета является важной формой обсуждения проведенного исследования, оно система применяется при проектировании турбин, работающих на параметрах выше стандартных сверхкритических (температура пара больше 570 °C), например 600 °C и давлении 300 бар. Полученные данные в ходе эксперимента, расчета и результатов подтверждают высокую эффективность испарительно-конденсационной системы охлаждения, реализованной с применением капиллярно-пористых структур.

На рисунке 7 представлены кинограммы процессов тепло – и массопереноса: а) фитиль 0.14×0.4; б) фитиль 0.4; $q = 40 \div 120 \text{ кВт/м}^2$; в) и г) фитиль 0.4 в увеличенном виде; $q = 94 \text{ кВт/м}^2$; $\tilde{m} = \frac{m_{\text{ж}}}{m_{\text{п}}} = 14$; $n = 0.14$.

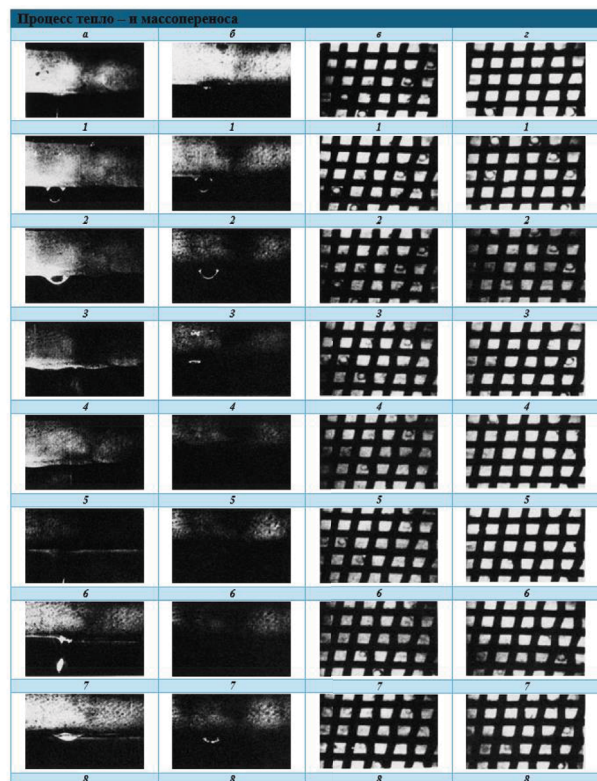


Рисунок – 7 – Кинограммы процессов тепло – и массопереноса: а) выброс охладителя; б) динамика пузырей в структуре 0.4.

На рисунке 8 представлен фрагмент из кинограммы (столбец «а» рис. 7) в увеличенном виде. Анализ фазовых превращений на поверхности теплообменных элементов указывает на ключевую роль процессов спонтанного зарождения, роста и разрушения паровых пузырей в общей тепловой динамике (см. рис. 7). Кратковременные, но мощные взрывные явления, происходящие в масштабе микросекунд (см. рис. 8, 9), могут не только усиливать теплообмен, но и вызывать кумулятивные и кавитационные

эффекты, способствующие ускоренному разрушению материала в области активных центров генерации.

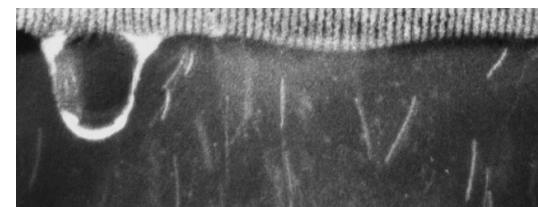


Рисунок – 8 – Фрагмент из кинограммы, рис. 7

На рисунке 9 представлен фрагмент из кинограммы (столбец «г» рис. 7) в увеличенном виде.

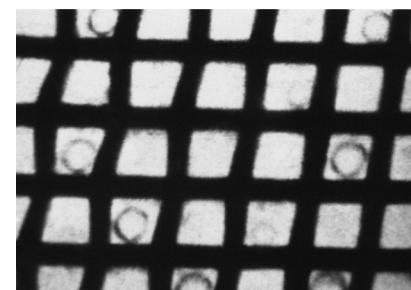


Рисунок – 9 – Фрагмент из кинограммы, рис. 7

На рис. 10 приводится явление выброса капель жидкости из капиллярно-пористой структуры виды 0.14×0.4 для тепловой нагрузки $q = 94 \times 103 \text{ Вт/м}^2$; избытка жидкости по отношению к расходу пара $\tilde{m} = \frac{m_{\text{ж}}}{m_{\text{п}}} = 1.1$.

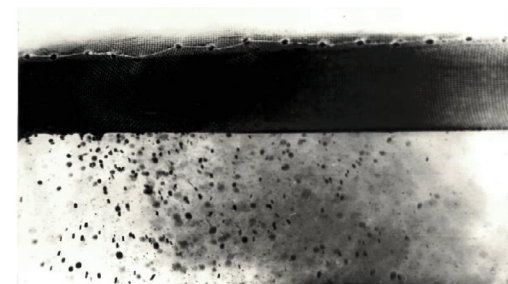


Рисунок – 10 – Явление выброса капель жидкости из паровой структуры

В частности, рост паровых пузырей в пористой структуре на стенке (см. рис. 7–10) сопровождается локальными изменениями давления, что создает предпосылки для кавитационного разрушения [2; 5; 6] и формирования микротрещин [7]. В работе [7] авторы рассмотрели предысторию образования микротрещин в теплоэнергетическом оборудовании. Сопутствующие процессы – электрохимическая коррозия и тепловые удары – усугубляют деградацию материала, особенно в условиях пуска и останова турбомашин.

Возможность разделения общей энергии (рис. 3) при рождении парового зародыша на энергию тепловой волны и энергию сжатого пара в зоне кипения структуры является важной идеей борьбы с эрозией и кавитацией.

Предложенная авторами модель охлаждающей системы, основанная на капиллярной подаче теплоносителя в замкнутом контуре с зонами испарения и конденсации (см. рис. 6), представляет собой перспективное направление для паровых турбинных установок нового поколения. Применение структур с подобранным гидравлическим диаметром (0.15×10^{-3} м) и толщиной сетчатого слоя (0.75×10^{-3} м) обеспечивает необходимую интенсивность теплоотвода при минимальном сопротивлении потоку.

Это делает данную технологию особенно привлекательной для замены дорогостоящих жаропрочных сплавов аустенитного класса, снижая стоимость и повышая надежность и ремонтпригодность оборудования. Особо отметим, что данные обсуждения строятся на единственно возможных оптических методах исследования, эффективной при прогнозировании срока службы паротурбинного оборудования на тепловых электростанциях на органическом топливе, и особенно на атомных электростанциях.

Кинограммы и голографические интерферограммы выявили динамику процессов тепломассопереноса от самых различных факторов: вид капиллярно-пористой структуры, тепловых нагрузок, избытка охладителя с расчетом плотности центров генерации и выбросов капель жидкости из структуры с образованием каверны [7] за счет эрозии от струйного потока (см. рис. 11).

Подбор избытка жидкости существенно снизит выброс капель, опасных для возникновения процессов кавитации (см. рис. 10).

Имитация аварийной ситуации за счет уменьшения вплоть до создания приводит к условиям кризиса кипения с образованием каверны [7]. Такой прием научного исследования может быть зарегистрирован только с помощью интерферограмм (см. рис. 11).

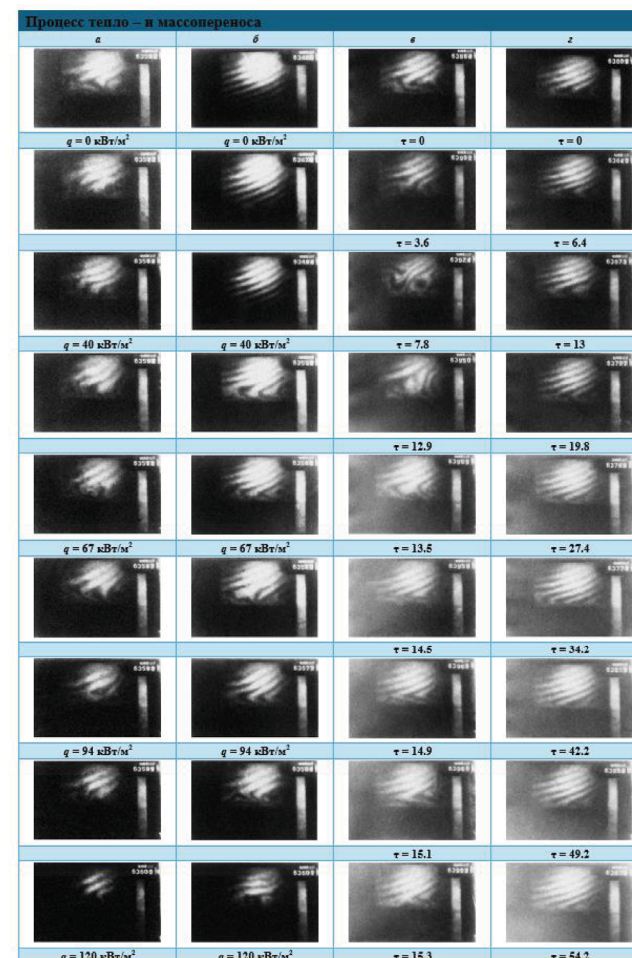


Рисунок – 11 – Голографические интерферограммы процессов тепло- и массопереноса структуры типа 0.4

Выводы

Разработаны установки для оптических методов исследования и показаны результаты обработки опытных данных в виде выброса капель жидкости, динамики развития паровой и жидкостной фаз для различных условий теплообмена (вид структуры, q , , ,).

Разработано охлаждение сопел паровых турбин для нестандартных закритических параметров. Анализ фазовых превращений на поверхности теплообмена показывает главную роль во взрывообразном поведении паровой фазы, которые вызывают кумулятивные и кавитационные эффекты. Исследованная система охлаждения является привлекательной для замены жаропрочных сплавов, повышая надежность оборудования.

Данные исследования построены на оптических методах, эффективных при прогнозировании срока службы оборудования.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Piowowski, M., Kosowski, K.; Richert, M.** Organic Supercritical Thermodynamic Cycles with Isothermal Turbine // *Energies* 16, 4745 (2023). <https://doi.org/10.3390/en16124745>

2 **Qingye, Li.** Numerical and experimental analysis of the cavitation characteristics of orifice plates under high-pressure conditions based on a modified cavitation model // *Int. Journal of Heat and Mass Transfer* 203, 123782 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.jheatmasstransfer.2022.123782>

3 **Kan, Kan.** Fluid deformation induced energy loss of pump-turbines based on the transport of mean kinetic energy // *Renewable Energy* 248, 122998 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.renene.2025.122998>

4 **Popov, A. V., Kulakov, E. N., Kruglikov, P. A.** Determining the Optimum Pressure Differential Across the Control Valve of a Hydroturbine Driven Pump // *Therm. Eng.* 71, 118-124 (2024). <https://doi.org/10.1134/S0040601524020071>

5 **Di, Ao.** A Review of Cavitation Problems of Cryogenic Fluids in Gathering Pipelines // *Journal of Pipeline Science and Engineering Available*, 100269 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.jpse.2025.100269>

6 **Sedlář, M., Koutný, A., Krátký, T., Komárek, M., Fulín, M.** Assessment of Cavitation Erosion Using Combined Numerical and Experimental Approach // *Fluids* 9, 259 (2024). <https://doi.org/10.3390/fluids9110259>

7 **Genbach, A.A., et. al.** Boiling crisis in porous structures // *Energy* 259, 125076 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125076>

8 **Ge, M., Zhang, G., Zhang, X.** Recent Developments and Future Directions in Flow Visualization: Experiments and Techniques // *Fluids* 10, 23 (2025). <https://doi.org/10.3390/fluids10020023>

9 **Litvintsova, Y. E., et. al.** Diagnostics of Transient Heat-Transfer Regimes during Pool Boiling Based on Wavelet Transform of Temperature Fluctuations // *Therm Eng.* 70, 875-884 (2023). <https://doi.org/10.1134/S0040601523110101>

10 **Volkov, A. V., Malenkov, A. S., Shelginsky, A. Ia.** Resource-Saving System of Heat and Cold Supply in Power Complex of the Metallurgical Plant //

In *Solid State Phenomena* 284, 1398-1403 (2018). <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ssp.284.1398>

Поступило в редакцию 21.05.25

Поступило с исправлениями 21.05.25

Принято в печать 08.09.25

*A. A. Genbach¹, *D. Yu. Bondartsev²*

^{1,2}Almaty University of Power Engineering and Telecommunications
named after G. Daukeev, Republic of Kazakhstan, Almaty

Received 21.05.25

Received in revised form 21.05.25

Accepted for publication 08.09.25

COOLING OF ADVANCED STEAM TURBINE BLADES WITH BOILING LIQUIDS

Boiling coolant cooling of advanced steam turbines operating above standard supercritical temperatures and pressures has been developed and investigated. A system operating according to the heat pipe scheme has been studied, with the mass potential added to the capillary potential. The calculation of the evaporating and condensing parts is performed. Installations for optical methods of investigating the dynamics of vapor and liquid phases development are developed. The dynamics of growth and fracture processes in capillary-porous structure by means of optical methods is considered. Kinograms and holographic interferograms of heat transfer processes for different wicks, thermal loads, liquid excess with calculation of internal characteristics of boiling, ejection of liquid droplets from the structure are presented. The possibility of separating the total energy at vapor nucleation is an important task of erosion and cavitation control. Simulation of an emergency situation by reducing the coolant flow rate to its minimum value is shown. The use of structures with a selected hydraulic diameter (0.15×10^{-3} m) and mesh layer thickness (0.75×10^{-3} m) provides the required heat dissipation intensity with minimal flow resistance. The proposed technology is particularly attractive for replacement of expensive austenitic class heat-resistant alloys, reducing the cost and increasing the reliability and maintainability of the equipment.

Key words: bubble flows, cavitation, cooling system, diaphragm, nozzle blades, porous medium, holography, high-speed filming.

А. А. Генбач¹, *Д. Ю. Бондарцев²^{1,2}Ғ. Даукеев атындағы Алматы Энергетика және Байланыс

Университеті, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.

21.05.25 ж. баспаға түсті.

21.05.25 ж. түзетулерімен түсті.

08.09.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

ПЕРСПЕКТИВАЛЫ БУ ТУРБИНАЛАРЫНЫҢ ҚАЛАҚТАРЫН ҚАЙНАҒАН СҰЙЫҚТЫҚТАРМЕН САЛҚЫНДАТУ

Стандартты суперкритикалық температуралар мен қысымдардан жоғары жұмыс істейтін перспективалы бу турбиналарын қайнаған салқындатқышпен салқындату әзірленді және зерттелді. Жылу құбырының схемасы бойынша жұмыс істейтін жүйе зерттеліп, капиллярлық потенциалға масса қосылды. Булану және конденсация бөліктерін есептеу жүргізілді. Бу және сұйық фазалардың даму динамикасын зерттеудің оптикалық әдістеріне арналған қондырғылар жасалды. Оптикалық әдістерді қолдана отырып, капиллярлық-кеукті құрылымдағы өсу және ыдырау процестерінің динамикасы қарастырылады. Әр түрлі фитильдерге арналған жылу беру процестерінің кинограммалары мен голографиялық интерферограммалары, жылу жүктемелері, қайнаудың ішкі сипаттамаларын есептей отырып, артық сұйықтық, құрылымнан сұйықтық тамшыларын шығару. Бу эмбрионының пайда болуындағы жалпы энергияны бөлу мүмкіндігі эрозия мен кавитациямен күресудің маңызды міндеті болып табылады. Салқындатқыштың шығынын оның минималды мәніне дейін төмендету арқылы төтенше жағдайға еліктеу көрсетілген. Таңдалған гидравликалық диаметрі $(0.15 \times 10^{-3} \text{ м})$ және торлы қабаттың қалыңдығы $(0.75 \times 10^{-3} \text{ м})$ бар құрылымдарды қолдану ең аз ағынға төзімділікпен қажетті жылу тарату қарқындылығын қамтамасыз етеді. Ұсынылған технология әсіресе аустенит класындағы қымбат ыстыққа төзімді қорытпаларды ауыстыру үшін тартымды, шығындарды азайтады және жабдықтың сенімділігі мен қызмет ету мерзімін жақсартады.

Кілтті сөздер: көпіршікті ағындар, кавитация, салқындату жүйесі, диафрагма, саптамалар, кеукті орта, голография, жылдамдық түсірілімі.

МРНТИ 44.37.29

<https://doi.org/10.48081/SXXP9307>

*Т. И. Глущенко¹, Т. В. Бедыч², Н. У. Бижанов³,
Д. Н. Утебаев⁴, Д. К. Имангазинова⁵

^{1,3,4}Костанайский региональный университет имени А. Байтурсынова,
Республика Казахстан, г. Костанай

²Костанайский инженерно-экономический университет имени М. Дулатова,
Республика Казахстан, г. Костанай

⁵Екибастузский инженерно-технический институт имени академика
К.Сатпаева, Республика Казахстан, г. Экибастуз

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5536-6304>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3642-8917>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0044-6398>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-6129-8465>

⁵ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0773-1781>

*e-mail: tatyana194@inbox.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ АВТОНОМНОЙ СИСТЕМЫ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ КАРБОНОВОГО ТЕПЛОАГРЕВАТЕЛЯ

В статье рассмотрено использование фотоэлектрических преобразователей в сочетании с карбоновым теплоагрегатом для создания автономной системы теплоснабжения мобильного дома фермера в условиях Костанайской области. Увеличение доли возобновляемой энергии диктуются современными условиями. Казахстан обладает возможностью применения возобновляемой энергии, в частности для автономных энергосистем. Обоснована наиболее выгодная ориентация фотоэлектрических преобразователей в пространстве для максимального генерирования мощности. На основе теоретических данных определены угол наклона и продолжительность светового дня для 52,30 северной широты, позволяющая обосновать величину емкости и количества аккумуляторов для стабильной работы системы теплоснабжения. Экспериментальные данные, полученные в ходе исследования, послужили основой для анализа системы теплоснабжения. Эти данные представлены графически: зависимости светового потока от

времени суток и генерируемой фотоэлектрическим преобразователем мощности. Определена емкость аккумуляторов, позволяющая обеспечить бесперебойную работу системы теплоснабжения мобильного домика фермера, особенно в климатических условиях Северного Казахстана. В статье намечены проблемы, возникающие при эксплуатации автономной системы теплоснабжения с применением карбонового теплонагревателя и предложены пути их решения. Основным недостатком возобновляемой энергии является сложность согласования источника энергии и потребителя по мощности, что крайне важно для применяемого в системе теплоснабжения оборудования. Для создания комфортного температурного режима проведены исследования температурной инерционности карбонового теплонагревателя, определена теплоустойчивость помещения. На основе экспериментальных данных разработана математическая модель системы теплоснабжения.

Ключевые слова: солнечная энергия, теплоснабжение, фотоэлектрический преобразователь, карбон, карбоновый тепловыделяющий материал

Введение

Возобновляемые источники энергии уверенно внедряются во все сферы деятельности человека и не только по причине дефицита энергии, или для охраны окружающей среды. В случаях отдаленности объектов потребления электрической и тепловой энергии использование возобновляемой энергии позволяет создать жизненно важные условия проживания человеку [1, с. 638-652].

Характерной особенностью Казахстана является животноводство, развитое сельское хозяйство на больших территориях. Костанайская область характеризуется развитым сельским хозяйством при больших площадях и распределении сельхозугодий на большом расстоянии друг от друга и от населенных пунктов, и, следовательно, на расстоянии от источников тепла и электрической энергии [2, с. 8-14]. На территории области много мелких подсобных хозяйств, которые занимаются выращиванием сельскохозяйственных культур и животноводством [3, с. 36-46].

Для создания комфортных условий проживания в период весенне-полевых работ и осенний период требуются передвижные пункты, обеспеченные тепловой и электрической энергией. Одним из решений такой проблемы является мобильный домик фермера, оборудованный обогревателем на основе карбонового тепловыделяющего материала. Это современный материал, обеспечивающий условия пожарной безопасности

и способный создать необходимый температурный режим при относительно небольшой потребляемой мощности. В качестве источника питания, для карбонового теплонагревателя используются солнечные фотоэлектрические преобразователи [4, с. 205-218].

Материалы и методы

Система теплоснабжения мобильного домика фермера построена по схеме, представленной на рисунке 1.

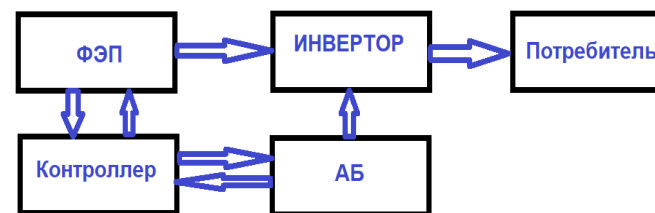


Рисунок 1 – Функциональная схема системы теплоснабжения мобильного домика фермера

В состав системы входят фотоэлектрические преобразователи (ФЭП) – генератор энергии, инвертор – преобразователь постоянного напряжения в переменное, контроллер «заряд-разряд» аккумуляторной батареи, АБ – аккумуляторные батареи, потребитель – обогревающего устройства на основе карбонового тепловыделяющего гибкого материала.

Технические параметры оборудования:

- два монокристаллических ФЭП марки ZDNY-250C60 размером 1650х992х45 мм мощностью 250 Вт каждый;
- инвертор синусоидальный ИС-24-1500У;
- контроллер марки PWM служит для контроля зарядки аккумуляторных батарей;
- две батареи аккумуляторные емкостью 100 А/час каждая;
- карбоновый теплонагреватель мощностью 500 Вт.

В связи с большим потенциалом солнечной энергии чрезвычайно заманчивым является максимально возможное непосредственное использование ее для нужд людей. При этом самым оптимальным представляется прямое преобразование солнечной энергии в наиболее распространенную в использовании электрическую энергию [5, с. 15-14].

Это становится возможным при использовании такого физического явления как фотоэффект. Принцип действия фотоэлектрического

преобразователя основан на фотоэффекте, генерировании энергии под действием освещенности. Количество генерируемой энергии пропорционально освещенности ФЭП. Освещенность зависит от сезона года, времени суток и от погодных условий (ясно или пасмурно). Продолжительность светового дня для 53,2° северной широты в зимний период минимальное значение составляет 7,3 часов, в летний период достигает 16,6 часов (таблица 1). Расчет угла склонения позволяет определить продолжительность светового дня, и дает основу для расчета освещенности, и как следствие – позволяет определить мощность фотоэлектрических преобразователей. При этом освещенность колеблется от 1000 лк, что составляет 4,6 Вт/м², при различных условиях в зимний период до 100000 лк (460 Вт/м²) в летний период для средних широт, к которым относится Костанайская область. Показатели Южных регионов Казахстана значительно выше.

Таблица 1 – Продолжительность светового дня для 53,2° северной широты

Месяц	Угол склонения, °	Продолжительность светового дня, час
январь	-23,01	7,40
февраль	-17,52	8,68
март	-8,29	10,51
апрель	4,02	12,72
май	14,90	14,78
июнь	21,90	16,34
июль	23,12	16,64
август	17,91	15,42
сентябрь	8,11	13,47
октябрь	-4,22	11,25
ноябрь	-15,36	9,13
декабрь	-22,11	7,62

Поток солнечной радиации, поступающий на землю, включает прямую и рассеянную радиацию. Даже в пасмурную погоду на поверхность ФЭП попадает рассеянный солнечный поток, который генерирует энергию. В ясную погоду прямая солнечная радиация составляет 90% и 10 % рассеянная радиация. В пасмурную погоду прямая радиация снижается почти до нуля и на фотопреобразователь действует только рассеянная солнечная радиация, при этом световой поток уменьшается в два раза.

На величину генерируемой мощности влияет ориентация ФЭП в пространстве и угол их наклона. Наиболее предпочтительной является

ориентация ФЭП на юг, так как при этом световой поток преобразуется максимально в электрическую энергию.

Угол наклона зависит от широты, на которой располагается ФЭП и сезона года. В идеале, для максимального генерирования мощности угол наклона необходимо менять, в зависимости от сезона и времени суток. В том случае, когда автоматическая система неприемлема можно ФЭП устанавливать неподвижно. В соответствии с рекомендациями [6, с. 30-43] оптимальный угол наклона можно принять равным широте, на которой располагается ФЭП. Автоматические системы подстройки угла наклона и ориентации достаточно сложные и дорогостоящие, поэтому для мобильного домика фермера принят угол наклона равный 55° [7, с. 317-324].

Испытание данной системы теплоснабжения началось в феврале, когда продолжительность светового дня составляла более 8,5 часов. В ходе исследований фиксировались показания фактической освещенности с помощью люксметра «ТКА-Люкс». Средние значения освещенности одной ФЭП по месяцам отображены на рисунках 2-4. Площадь поверхности одного фотоэлектрического преобразователя составляет 1,64 м², а генерируемая мощность определяемая для одного ФЭП представлена на рисунках 1-3. Номинальная мощность одного ФЭП составляет 250 Вт, а под действием светового потока генерируется мощность, превышающая это значение.

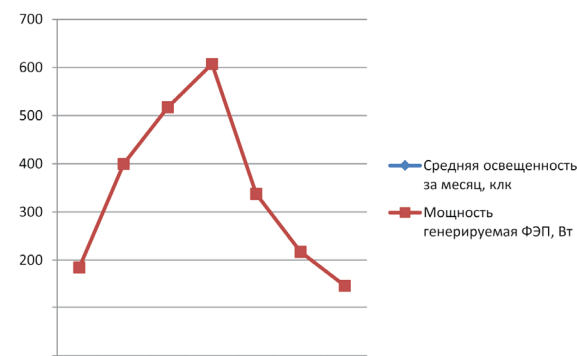


Рисунок 2 – Средняя освещенность ФЭП и генерируемая мощность в феврале

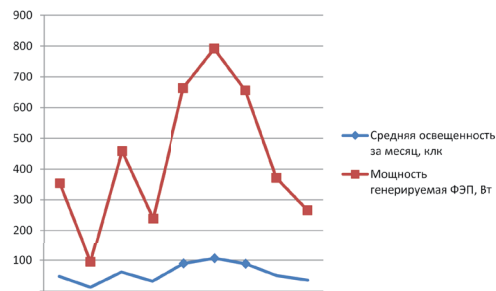


Рисунок 3 – Средняя освещенность ФЭП и генерируемая мощность в марте

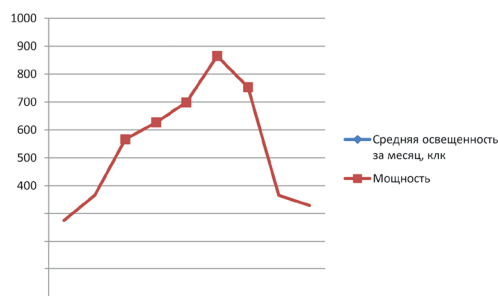


Рисунок 4 – Средняя освещенность ФЭП и генерируемая мощность в апреле

Анализируя приведенные графики можно сделать следующие выводы:
– освещенность одного ФЭП в феврале с 10.30 до 14.30 превышает 250 Вт, что позволяет не только заряжать аккумуляторные батареи но и подключать бытовые электроприборы.

Учитывая погодные условия в регионе температура в ночное время понижается в среднем до $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$, что способствует большей потере емкости аккумуляторных батарей.

В марте и апреле угол склонения Солнца становится положительным, продолжительность светового дня увеличивается, и генерируемая мощность превышает номинальную мощность ФЭП. Для электрических цепей очень важно согласование потребляемой и генерируемой энергии. Излишки генерируемой энергии должны быть аккумулированы. В том случае, когда емкости аккумуляторов недостаточно, необходимо сбрасывать излишки энергии [8, с. 77-83; 9, с. 450–453]. То есть, электрическую энергию можно использовать для питания электроприборов и освещения.

В ходе исследований данной системы теплоснабжения было установлено, что при низких температурах аккумуляторы быстро теряют емкость. Емкость имеющихся аккумуляторов недостаточная для поддержания системы теплоснабжения в рабочем состоянии. Согласно существующей методике [10, с. 101-112; 11, с. 1475–1490] при определении емкости аккумуляторной батареи (АБ) необходимо вводить коэффициент, зависящий от температуры окружающей среды. Для расчета принимает температуру воздуха наиболее характерную для данного региона $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Рассчитывается емкость аккумуляторов с учетом потребляемой энергии в вечернее и ночное время [12, с. 2926–2939]. Наименьшая продолжительность светового дня для расчетной широты составляет 7,4 часа. Тогда потребляемая энергия в оставшееся время суток составит, Вт·ч:

$$W = P_{\text{потр}} \cdot t_{\text{раб}} \quad (1)$$

где $P_{\text{потр}}$ – номинальная мощность карбонового нагревательного элемента, Вт;

$t_{\text{раб}}$ – время работы аккумуляторной батареи без подзарядки.

$$W = 500 \cdot 16,6 = 8300$$

При расчете емкости АБ в полностью автономном режиме необходимо принимать во внимание наличие пасмурных дней, в течение которых аккумулятор должен обеспечивать работу потребителей. За максимальное число последовательных «дней без солнца» можно принять установленное количество дней, в течение которых АБ будет питать нагрузку самостоятельно без подзаряда.

От глубины разряда АБ δ зависит срок службы аккумуляторной батареи. Чем больше δ , тем быстрее АБ выйдут из строя. Рекомендуемое значение глубины разряда 20% (не более 30%). Это значит, что возможно использование 20% от значения номинальной емкости АБ. Ни при каких обстоятельствах разряд батареи не должен превышать 80%. Для исследуемой системы принимаем глубину разряда 30%.

Емкость аккумуляторной батареи зависит также от температуры окружающей среды. Снижение емкости аккумуляторов при понижении температуры учитывает температурный коэффициент K_s .

Емкость аккумуляторной батареи (АБ) выбирается из стандартного ряда емкостей с округлением в сторону, большую расчетной. Расчетная емкость АБ (А·ч) определяется по формуле:

$$C_{\text{расч}} = \frac{W}{U_{\text{АБ}} \cdot \delta} \quad (2)$$

где W – количество потребленной энергии (Вт·ч);

$U_{\text{АБ}}$ – напряжение АБ; В;

δ – допустимая глубина разряда АБ.

$$C_{\text{расч}} = \frac{8300}{24 \cdot 0,3} = 1152,8 \text{ А} \cdot \text{ч}$$

Время полного разряда Тразр батареи емкостью САБ под воздействием нагрузки мощностью $P_{\text{потр}}$ можно определить:

$$T_{\text{раз}} = \frac{C_{\text{АБ}} \cdot 8,5}{P_{\text{потр}}} \quad (3)$$

$$T_{\text{раз}} = \frac{1152,8 \cdot 8,5}{500} = 19,6 \text{ часов.}$$

Расчетное время разряда превышает необходимое время работы аккумуляторов без подзарядки, что позволит обеспечить бесперебойную работу системы теплоснабжения мобильного домика фермера.

Основным параметром системы теплоснабжения является температура внутри помещения домика фермера. Колебания температуры внутреннего воздуха неблагоприятно отражаются на самочувствии человека. В качестве допустимых наибольших пределов таких колебаний в зимнее время года нормы устанавливают их амплитуду $\Delta t = \pm 1,5^\circ$ при центральных отопительных системах и $\Delta t = \pm 3^\circ$ — при печном отоплении. Результаты измерений показывают, что колебания температуры отличаются от рекомендуемых и достигают 28°C [13, с. 384–389; 14, с. 28–39]. Эти данные позволяют сделать вывод, что для создания необходимого температурного режима в помещении требуется установить терморегулятор, который будет отключать карбоновый теплогенератор при достижении установленного порога температуры.

За время испытания системы теплоснабжения проводились замеры температуры наружного воздуха, температура внутри помещения и температура вырабатываемая карбоновыми панелями тепловизором testo 875. Результаты измерений представлены на рисунках 5-6. Максимальная температура, до которой нагреваются карбоновые теплогенераторы составляет 85°C . По кривым нагрева можно определить тепловую инерцию карбоновых нагревателей, которая составила 12 минут в апреле и 36 минут в марте. Среднее значение тепловой инерции составляет 24 минуты. Для получения более точных данных этого параметра требуются дальнейшие исследования.

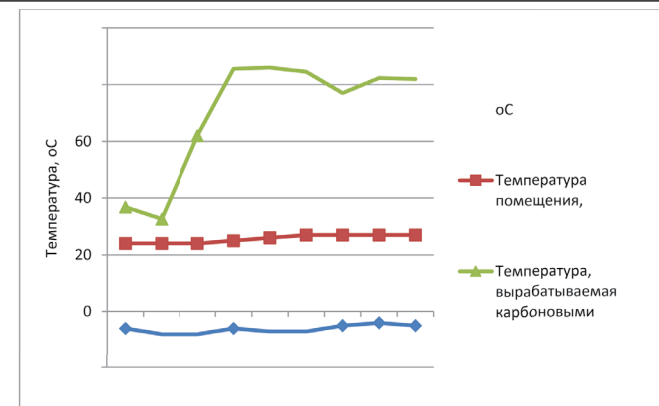


Рисунок 5 – графики корреляционной связи между средней освещенностью фотоэлектрических преобразователей и температурой внутри помещения в феврале

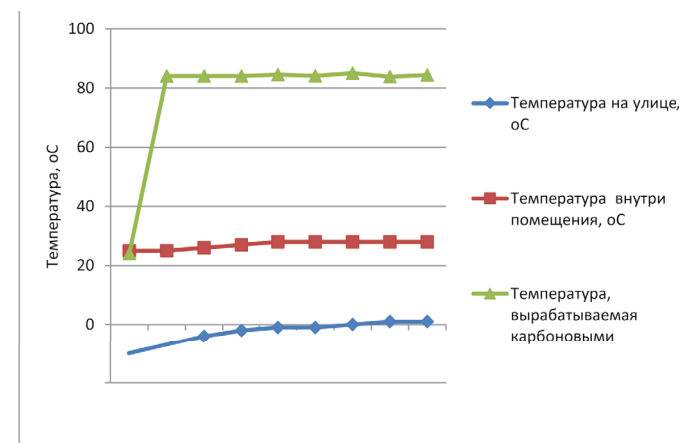


Рисунок 6 – Графики корреляционной связи между средней освещенностью фотоэлектрических преобразователей и температурой внутри помещения в марте

Тепловая устойчивость домика фермера изменяется от 2,5 до 28, в зависимости от температуры наружного воздуха. Очевидно, что требуется дополнительная теплоизоляция помещения, для сохранения температуры внутри помещения.

Проведя анализ экспериментальных данных можно построить графики корреляционной связи между средней освещенностью фотоэлектрических преобразователей и температурой внутри помещения (рисунки 4-6). Результаты расчетов корреляции приведены в таблице 2 [15, с. 580–603; 16, с. 691–705].

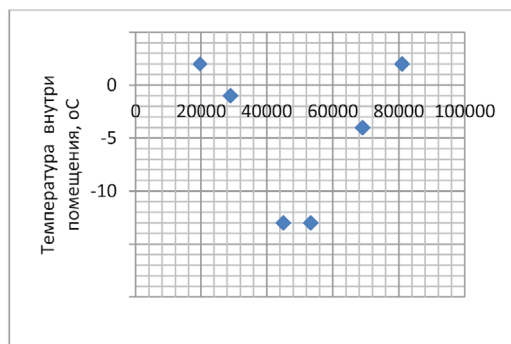


Рисунок 7 – Корреляционная зависимость для февраля

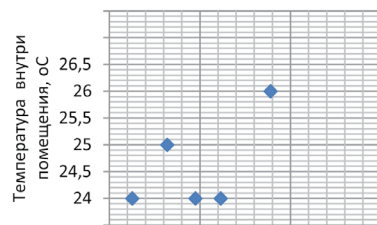


Рисунок 8 – Корреляционная зависимость для марта

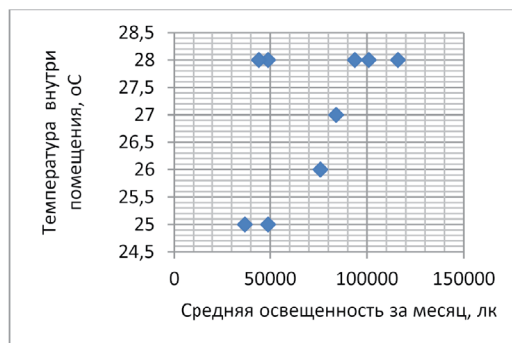


Рисунок 9 – Корреляционная зависимость для апреля

Таблица 2 – Корреляция между средней освещенностью и температурой внутри помещения по месяцам

Время замера	Февраль			Март			Апрель		
	Средняя освещенность за месяц, лк	Температура внутри помещения, оС	Коэффициент корреляции	Средняя освещенность за месяц, лк	Температура внутри помещения, оС	Коэффициент корреляции	Средняя освещенность за месяц, лк	Температура внутри помещения, оС	Коэффициент корреляции
9.00	-	-	0,185	47500	24	0,512	37000	25	0,518
10.00	24667	-16		12700	24		49000	25	
11.00	53333	-13		61500	24		76000	26	
12.00	69000	-4		32000	25		84100	27	
13.00	81000	2		89000	26		93800	28	
14.00	45000	-13		106200	27		116000	28	
15.00	29000	-1		88000	27		101000	28	
16.00	19600	2		49800	27		49000	28	
17.00	-	-		35700	27		44200	28	

Положительный коэффициент корреляции свидетельствует о наличии связи между выбранными параметрами. На этом основании проведено математическое моделирование.

Математическая модель дает возможность прогнозировать значения температуры внутри помещения от освещенности панелей, температуры наружного воздуха и температуры карбонового теплонагревателя.

Для расчета математической модели были приняты три наиболее значимых фактора для дальнейшего расчета: (X_1 – освещенность; X_2 – температура наружного воздуха; X_3 – температура карбонового теплонагревателя).

Под критерием оптимизации (Y) была принята средняя температура воздуха внутри помещения. Периодичность замеров эксперимента 1 час.

В результате расчета уравнение регрессии получило следующий вид:

$$Y = 26,33 - 2,88x_1 - 2,77x_2 + 3,11x_3 \quad (4)$$

Полученная модель проверена по критерию Фишера и является адекватной.

Результаты и обсуждение

Деятельность человека повсеместно связана с потреблением энергии. Уровень развития общества оценивается потреблением энергии на душу населения, чем выше потребление энергии, тем выше уровень развития общества. Современные тенденции потребления энергии направлены на снижение доли углеводородных источников энергии и увеличения доли возобновляемой энергии. Возможности Казахстана в использовании возобновляемой энергии большие. Этому способствуют значительные территории и развитое сельское хозяйство и животноводство.

Создание комфортных условий для механизаторов и пастухов с учетом современного уровня технического развития реализовать относительно просто. Примером является создание мобильного домика фермера с использованием возобновляемых источников энергии для его тепло- и электроснабжения. Предлагаемая система теплоснабжения может создать необходимый температурный режим в передвижном помещении и обеспечить автономность системы.

Выводы

Приведенные расчеты на основе полученных экспериментальных измерений позволяют сделать выводы:

1 Предлагаемая система теплоснабжения с использованием солнечной энергии позволяет генерировать необходимую мощность для стабильной работы системы;

2 Для обеспечения бесперебойной работы системы необходимо точно определить емкость аккумуляторных батарей и установить их в помещении, для создания благоприятного температурного режима эксплуатации;

3 Для согласования источника энергии и нагрузки необходимо либо установить демпферное устройство, и тогда излишняя мощность будет сбрасываться, либо увеличить потребляемую мощность за счет бытовой техники, что вполне разумно и экономично.

4 Проведен анализ температурного режима в помещении на основании которого принято решение использовать в схеме теплоснабжения регулятор температуры для комфортного самочувствия человека.

5 Определена тепловая инерционность карбонового теплонагревателя, которая колеблется в зависимости от температуры наружного воздуха и составляет 12 – 36 минут.

6 Тепловая устойчивость помещения показывает, что необходимо усилить теплоизоляцию помещения.

7 На основании корреляционной связи определена математическая модель системы теплоснабжения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Turgel, I., Bozhko, L., Biserov, E., Naizabekov, A., Priorities of the State Environmental Policy of Russia and Kazakhstan: Global Agenda and Regional Projection, Environmental and Climate Technologies 2020, Vol. 24, No. 1, P. 638–652 <https://doi.org/10.2478/rtuect-2020-0039> – <https://content.sciendo.com>

2 Adilbekov, E. K., Sultanov, T. T. Review of renewable energy sources in the Republic of Kazakhstan. Bulletin of the L. N. Gumilyov Eurasian National University. Series: Technical Science and Technology 2018:1(122): p. 8–14.

3 Jekabsons, A., Kamenders, A., Rosa, M., Kaselofsky, J., Schuler, R. Assessment of the Implementation of Sustainable Energy Action Plans at Local Level. Case Study of Latvia, Environmental and Climate Technologies 2019, Vol. 23, No. 2, P. 36–46 doi: [10.2478/rtuect-2019-0053](https://doi.org/10.2478/rtuect-2019-0053) <https://content.sciendo.com>

4 Petersen, J. P. The application of municipal renewable energy policies at community level in Denmark: A taxonomy of implementation challenges. Sustainable Cities and Society 2018:38: P. 205–218. doi:[10.1016/j.scs.2017.12.029](https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.12.029)

5 Latosov, E., Volkova, A., Siirde, A., Kurnitski, J., Thalfeldt, M. Methodological approach to determining the effect of parallel energy consumption on district heating system. Environmental and Climate Technologies 2017:19: p. 15–14. doi:[10.1515/rtuect-2017-0001](https://doi.org/10.1515/rtuect-2017-0001)

6 Miežis, M., Zvaigznitis, K., Stancioff, N., Soeftestad, L. Climate Change and Buildings Energy Efficiency – the Key Role of Residents. Environmental and Climate Technologies 2016:17: P. 30–43. – <https://doi.org/10.1515/rtuect-2016-0004>

7 Palu, I., Tammoja, H. & Oidram, R. 2008. Thermal power plant cooperation with wind turbines. Estonian J. Engineering 14 (4). Estonia, P. 317–324.

8 Khabdullin, A., Khabdullina, Z., Khabdullina, G., Development of energy-saving methods for minimization of power and load losses, Eurasian Journal of Physics and Functional Materials, 2018, 2(1), P. 77–83

9 Khabdullin, A., Khabdullina, Z., Khabdullin, A., Lauka, D., Blumberga, D., Analysis of Industrial Electricity Consumption Flexibility. Assessment of Saving Potential in Latvia and Kazakhstan, Energy Procedia, 2017, 113, P. 450–453

10 Chamandoust, H. et al. Tri-objective scheduling of residential smart electrical distribution grids with optimal joint of responsive loads with renewable energy sources. Journal of Energy Storage 2020:27:P.101-112. <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.101112>

11 Dalton, G., Lockington, D., Baldock, T. Feasibility Analysis of Stand-Alone Renewable Energy Supply Options for a Large Hotel. Renewable energy 2008:33(7):p.1475–1490. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2007.09.014>

12 **Bajpai, P., Dash, V.** Hybrid Renewable Energy Systems for Power Generation in Stand-Alone Applications: A Review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2012;16(5): P. 2926–2939. – <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.009>

13 **Silva, S., Severino, M., De Oliveira, M.** A Stand-Alone Hybrid Photovoltaic, Fuel Cell and Battery System: A Case Study of Tocantins, Brazil. Renewable energy 2013;57:P.384–389. – <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.02.004>

14 **Barati, H., Aminzadeh, H.** Load Power and Frequency Control Based on Modified Droop Method in Hybrid Systems Wind Turbine/ Photovoltaic/ Fuel Cell in Autonomous Stand-Alone Micro-Grids. Energy: Engineering & Management 2016;6:P.28–39.

15 **Hashemi, A. et al.** Optimal Scheduling of Residential Electricity Demand Based on the Power Management of Hybrid Energy Resources. Environmental and Climate Technologies 2020;24(1):P. 580–603. <https://doi.org/10.2478/rtuect2020-0036>

16 **Hashemi, A., Derakhsang, G., Pahlavani, A., Abdi, B.,** Techno-Economic Analysis of a Stand-Alone Hybrid Wind-Power Fuel-Cell Grid System: A Case Study in Shahryar Region of Tehran, Environmental and Climate Technologies 2020, Vol. 24, no. 1, P. 691–705 <https://doi.org/10.2478/rtuect-2020-0043> <https://content.sciendo.com>

Поступило в редакцию 02.05.25
Поступило с исправлениями 24.07.25
Принято в печать 05.09.25

*Т. И. Глущенко¹, Т. В. Бедыч², Н. У. Бижанов³, Д. Н. Утебаев⁴,
Д. К. Имангазина⁵

^{1,3,4}А.Байтұрсынова атындағы Қостанай өңірлік университеті,
Қазақстан Республикасы, Қостанай қ.

²М. Дулатов атындағы Қостанай инженерлік-экономикалық университеті
Қазақстан Республикасы, Қостанай қ.

⁵Академик Қ. Сәтбаев атындағы Екібастұз инженерлік-техникалық
институты, Қазақстан Республикасы, Екібастұз қ.

02.05.25 ж. баспаға түсті.

24.07.25 ж. түзетулерімен түсті.

05.09.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

КОМІРТЕКТІ ЖЫЛЫТҚЫШТЫ ҚОЛДАНА ОТЫРЫП, АВТОНОМДЫ ЖЫЛУМЕН ЖАБДЫҚТАУ ЖҮЙЕСІН ЗЕРТТЕУ

Мақалада Қостанай облысы жағдайында фермердің жылжымалы үйін автономды жылумен жабдықтау жүйесін құру үшін көміртекті жылу жылытқышымен бірге фотоэлектрлік түрлендіргіштерді қолдану қарастырылған. Жаңартылатын энергия үлесінің артуы қазіргі жағдайларға байланысты. Қазақстан жаңартылатын энергияны, атап айтқанда автономды энергия жүйелері үшін пайдалану мүмкіндігіне ие. Максималды қуат алу үшін кеңістіктегі фотоэлектрлік түрлендіргіштердің ең тиімді бағыты негізделген. Теориялық мәліметтер негізінде жылумен жабдықтау жүйесінің тұрақты жұмыс істеуі үшін батареялардың сыйымдылығы мен санын негіздеуге мүмкіндік беретін 52,30 солтүстік ендік үшін ауытқу бұрышы мен күндізгі жарықтың ұзақтығы анықталды. Зерттеу нәтижесінде алынған эксперименттік деректер жылумен жабдықтау жүйесін талдауға негіз болды. Бұл деректер графикалық түрде ұсынылған: жарық ағынының тәулік уақытына және фотоэлектрлік түрлендіргіш шығаратын қуатқа тәуелділігі. Фермердің жылжымалы үйінің жылумен жабдықтау жүйесінің, әсіресе Солтүстік Қазақстанның климаттық жағдайларында үздіксіз жұмысын қамтамасыз етуге мүмкіндік беретін аккумуляторлардың сыйымдылығы анықталды. Мақалада көміртекті жылу жылытқышын қолдана отырып, автономды жылумен жабдықтау жүйесін пайдалану кезінде туындайтын проблемалар көрсетілген және оларды шешу жолдары ұсынылған. Жаңартылатын энергияның негізгі кемшілігі-энергия көзі мен тұтынушыны электр қуаты бойынша үйлестірудің күрделілігі, бұл жылумен жабдықтау жүйесінде қолданылатын жабдық үшін өте маңызды. Қолайлы температуралық режимді құру үшін көміртекті жылу жылытқыштың температуралық инерциясына зерттеулер жүргізілді, бөлменің жылуды тәжірибелігі анықталды. Эксперименттік мәліметтер негізінде жылумен жабдықтау жүйесінің математикалық моделі жасалды.

Кілтті сөздер: күн энергиясы, жылумен жабдықтау, фотоэлектрлік түрлендіргіш, көміртек, көміртекті жылу шығаратын материал

*Т. И. Глущенко¹, Т. В. Бедыч², Н. У. Бижанов³,
Д. Н. Утебаев⁴, Д. К. Имангазина⁵

^{1,3,4}Kostanay Regional University named after A. Baitursynova,

Republic of Kazakhstan, Kostanay

²Kostanay University of Engineering and Economics named after M. Dulatova,

Republic of Kazakhstan, Kostanay

⁵Ekibastuz Engineering and Technical Institute named after Academician

K.Satpayev, Republic of Kazakhstan, Ekibastuz

Received 02.05.25

Received in revised form 24.07.25

Accepted for publication 05.09.25

INVESTIGATION OF AN AUTONOMOUS HEAT SUPPLY SYSTEM USING A CARBON FIBER HEAT HEATER

The article discusses the use of photovoltaic converters in combination with a carbon fiber heat heater to create an autonomous heat supply system for a mobile farmer's house in the Kostanay region. The increase in the share of renewable energy is dictated by modern conditions. Kazakhstan has the potential to use renewable energy, in particular for autonomous power systems. The most advantageous orientation of photovoltaic converters in space for maximum power generation is substantiated. Based on theoretical data, the declination angle and daylight duration for 52.30 north latitude are determined, which makes it possible to justify the amount of capacity and number of batteries for stable operation of the heat supply system. The experimental data obtained during the study served as the basis for the analysis of the heat supply system. These data are presented graphically: the dependence of the luminous flux on the time of day and the power generated by the photovoltaic converter. The battery capacity has been determined to ensure the uninterrupted operation of the heat supply system of a mobile farmer's house, especially in the climatic conditions of Northern Kazakhstan. The article outlines the problems that arise during the operation of an autonomous heat supply system using a carbon fiber heater and suggests ways to solve them. The main disadvantage of renewable energy is the difficulty of matching the energy source and the consumer in terms of capacity, which is extremely important for the equipment used in the heat supply system. To create a comfortable temperature regime, studies of the temperature inertia of a carbon fiber heater were carried out, and the thermal stability of the room was determined. A mathematical model of the heat supply system has been developed based on experimental data.

Keywords: solar energy, heat supply, photovoltaic converter, carbon fiber, carbon fiber heat-generating material.

SRSTI 44.09.39

<https://doi.org/10.48081/YDUC4699>

**N. Darimbayeva¹, *M. Sakitzhanov²,
Zh. Toygozhinova³, M. Zharkymbekova⁴**

^{1,2,3,4}Almaty University of Power Engineering and Telecommunications (AUPET) named after G. Daukeyev, Almaty, Kazakhstan

¹ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-9787-2839>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0955-8938>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6597-4728>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2285-8716>

*e-mail: m.sakitzhanov@auet.kz

KAZAKHSTAN'S ENERGY TRANSFORMATION: HOW GREEN TECHNOLOGIES CAN CHANGE THE FUTURE

The article is devoted to the energy transformation in Kazakhstan, focusing on the need to switch to sustainable energy sources in the face of growing electricity consumption and environmental problems associated with dependence on coal-fired power. The text examines global trends such as reducing carbon emissions and the transition to renewable energy sources, as well as the role of Kazakhstan in these processes. The article analyzes the current problems of the country's energy infrastructure, including the high level of deterioration of heating networks and the need for modernization, as well as discusses the prospects and challenges of developing green technologies such as solar, wind and biomass energy. Special attention is paid to financial support for renewable energy projects, as well as opportunities for the country to improve the environmental situation and economic growth through the introduction of innovative technologies. In conclusion, the importance of further efforts to develop infrastructure, train specialists and attract investments to achieve a sustainable energy future for Kazakhstan is emphasized.

Keywords: Renewable energy sources, energy transformation, green technologies, solar energy, wind power plants.

Introduction

Energy transformation in Kazakhstan is becoming an important topic in the context of global changes facing the global energy sector. Every year, the country's population increases, which leads to an increase in electricity consumption and increases pressure on the existing energy infrastructure. Traditionally, Kazakhstan depends on coal and other fossil energy sources, which contributes to high levels of environmental pollution and environmental degradation. It is important to note that Kazakhstan is one of the ecologically polluted countries, and its energy sector requires serious transformations to ensure sustainable development [1, P.1].

In the context of global trends such as the reduction of carbon dioxide emissions, the transition to renewable energy sources and the fight against climate change, Kazakhstan cannot remain on the sidelines. Striving to improve the environmental situation and transition to green technologies is not only an internal necessity, but also an important part of global efforts to reduce global warming. The world's leading countries are already actively implementing projects to introduce green technologies into the energy sector, and Kazakhstan, with its rich natural resources and strategic location, has every opportunity to take its rightful place among the leaders in clean energy production in Central Asia [2, P.8–9].

The Mazhilis of the Parliament of the Republic of Kazakhstan has repeatedly considered this issue, as the country's heating networks are under significant pressure due to high wear and tear (53 %) and insufficient funding. Many heating companies face problems such as debt obligations and low profitability, which limits their ability to modernize infrastructure. In response to these challenges, a new law «On Thermal Energy» was adopted, which provides for the transfer of authority to manage heating networks to the Ministry of Energy, the development of heat supply schemes and increased state control. In 2024, 119.77 billion tenge is planned to be allocated from the national and local budgets for the modernization of heating networks [3, P.1].

In the context of these efforts, an important question arises about priorities in the development of energy infrastructure. The choice between repairing thermal power plants and building renewable energy sources depends on long-term goals. If the priority is sustainable development, reducing carbon emissions and switching to clean energy, then the construction of wind and solar power plants will be more profitable in the future. Green technologies not only contribute to environmental protection, but also ensure economic efficiency in the long term, reducing dependence on fossil energy sources [4, P.110].

This article will examine how energy transformation based on green technologies can become a decisive factor for Kazakhstan's sustainable development, as well as how the country can contribute to solving global environmental problems.

Materials and methods

According to a report by the Energy Institute, global carbon emissions from energy production in 2023 reached a record 40.4 billion tons of CO₂ equivalent, up 2.1 % from the previous year. After the reduction of emissions in 2020 caused by the pandemic, carbon emissions from energy have started to rise again, indicating the inevitability of a global problem related to the consumption of fossil energy sources.

In this regard, the energy sector remains the main source of greenhouse gas emissions, mainly due to the burning of fossil fuels such as oil and coal. In 2023, China accounted for almost a third of global carbon emissions, which produced 12.6 billion tons of CO₂ equivalent. This is significantly more than the combined emissions of all countries in the Western Hemisphere and Europe. China's high emissions are due not only to its large population, but also to the country's significant dependence on coal and oil, despite active investments in renewable energy. China's carbon emissions increased by 6 % over the year.

Further, the United States took the second place in terms of carbon emissions in 2023 with 5.1 billion tons, and India took the third place with 3.1 billion tons. In India, coal accounts for 56% of primary energy consumption, and the country is actively planning to double its coal production by 2030, which will lead to an increase in its share of global carbon emissions to 10 % by 2030, according to forecasts by the International Energy Agency.

As for Kazakhstan, like many other countries, it does not stay away from this global trend. In 2023, carbon emissions from energy production in Kazakhstan increased by 11.2 %, from 277.5 million to 308.7 million tons of CO₂ equivalent, which is a record high. This situation is alarming, since the increase in carbon emissions is directly related to the high level of dependence on coal-fired power and insufficient diversification of the country's energy sector [5, P. 1].

Despite efforts to introduce green technologies such as solar and wind farms, Kazakhstan still faces serious environmental challenges related to the energy sector. In this context, urgent measures must be taken to reduce carbon emissions and transition to more sustainable energy sources, which will help the country not only improve its environmental situation, but also integrate into the global environmental agenda.

Experts of the Power Tech 2025 conference in Almaty mentioned that one of the sections of the forum will be devoted to discussing the development vectors of «green» financing. Green finance is an important component of investments aimed at implementing environmentally friendly, energy efficient and low-carbon projects. Such projects include renewable energy, improving the energy efficiency of existing enterprises, environmentally friendly transport, and developing a low-carbon economy. According to the Astana International Financial Center

(AIFC), in 2024, the volume of the sustainable finance market in the country amounted to 277.8 billion tenge, including «green» bonds and loans. The main part of the «green» money is directed to energy efficiency and renewable energy projects [6, P. 2].

As the population grows and the number of companies increases, there is a steady increase in electricity consumption in Kazakhstan. According to estimates by power engineers, they were the reason for the shortage of capacity of more than 1 GW. In response to this situation, Kazakhstan was forced to step up its electricity imports from Russia. To ensure a sustainable energy supply to the country, further development of energy infrastructure and the introduction of alternative energy sources are necessary [7, P.1].

According to the analysis, the population of Kazakhstan by 2030 may range up to 21.5 million under a positive scenario. By 2050, the population is expected to increase to 27.7 million people (Fig. 1). In this regard, an increase in electricity consumption is predicted, due to an increase in the number of consumers and an increase in energy demand against the background of demographic changes [8, P.1].

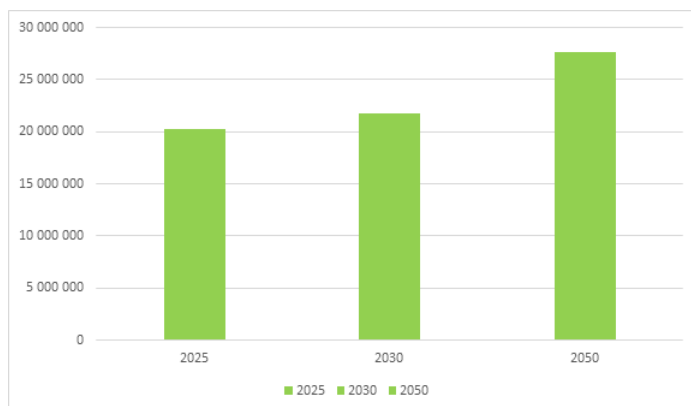


Figure 1 – Forecast of population growth dynamics in Kazakhstan based on data from the Center for Human Resources Development JSC

The government is taking steps to stimulate the growth of the sector. As part of the energy sector modernization program, it is planned to launch 40 new renewable energy projects by 2025. These projects should create more than 3,000 jobs and contribute to the economic development of the regions. However, the implementation of these initiatives requires clear planning and coordination between various government agencies and the private sector [9, P.1].

The Government of Kazakhstan plans to increase the share of renewable energy in total electricity production to 15 % by 2030 and 50 % by 2050 [10, P.1].

Kazakhstan has great potential for using solar energy. The country is located in regions with high solar insolation, especially in the southern and central regions, which makes solar stations very promising. In recent years, there has been an increase in the number of solar power plants.

Economically, solar panels have low operating costs, and their efficiency increases significantly with lower technology costs. The emergence of new, more efficient panels makes solar installations economically attractive.

Kazakhstan is actively developing solar energy, and this industry has a high potential for further growth. It is also important that solar installations can be located in various regions, including remote areas where there is no access to centralized electricity supply.

Kazakhstan has great opportunities for the development of wind energy, especially in many steppe regions and on the coast of the Caspian Sea, where the average annual wind speed is quite high. Wind turbines can generate stable amounts of energy, especially in regions with constant wind conditions.

Wind turbines require significant initial investment, but they can provide long-term and sustainable energy generation. Also, wind energy does not depend on fuel prices, as it happens with thermal power plants [11, P. 2].

The development of biomass energy can be beneficial for Kazakhstan, especially in rural and agricultural regions where there is excess agricultural waste. Using biomass for energy production helps to reduce carbon dioxide emissions and reduce waste. This aspect of biomass is so relevant, with a skillful organization, it could well realize the self-sufficiency of rural areas, in particular, every yard in rural areas with gas, moreover, natural fertilizer gardening, as part of an ecosystem solution - reducing CO₂ emissions. It should be emphasized that today more than 35 % of the population is still rural, then with the successful implementation of the above-mentioned issue regarding biomass, a number of problems would naturally find a solution in rural areas. Moreover, the optimal solution to biomass problems would to a certain extent become attractive to the population as part of the development of small and medium-sized businesses in rural areas [12, P.1].

Energy production from biomass can be cost-effective, especially in rural areas, due to the availability of raw materials such as animal manure on small farms. In rural areas, it is often a problem to transport manure to remote disposal sites, which requires additional transportation costs. The use of these raw materials for energy production can not only reduce export costs, but also become a source of income, as well as help solve environmental problems related to the disposal of organic waste.

Biomass energy in Kazakhstan has potential for development, but at the moment it is less developed than solar and wind energy. However, with increasing interest in sustainable energy sources, this sector may become more in demand.

Moreover, green technologies can bring significant advantages to Kazakhstan. First, they will help reduce dependence on fossil energy sources such as coal and oil, making the country more energy independent and resilient to fluctuations in global hydrocarbon prices. Secondly, the transition to renewable energy sources such as solar and wind energy will improve the environmental situation by reducing emissions of carbon dioxide and other pollutants. Thirdly, the development of green technologies will open up new opportunities for job creation in various industries, from the construction and operation of energy facilities to scientific research and innovation development. Thus, Kazakhstan, by actively developing environmentally friendly energy, can attract foreign investment, which will stimulate economic growth and the country's integration into global environmental and economic processes.

To date, 148 renewable energy facilities (over 100 kW) with an installed capacity of 2903.7 MW have been commissioned and are in operation:

- 59 wind power plants with a capacity of 1409.55 MW;
- 46 solar power plants with a capacity of 1222.61 MW;
- 40 hydroelectric power plants with a capacity of 269.785 MW;
- 3 facilities of biogas power plants with a capacity of 1.77 MW.

Based on the results of the auctions and contracts concluded with RFC LLP for Renewable Energy, 66 renewable energy projects with a total capacity of 1,682.4 MW are planned to be commissioned. The amount of attracted investments will amount to about 720 billion tenge:

- 34 hydroelectric power plants with a capacity of 311.11 MW;
- 20 wind power plants with a capacity of 1110 MW;
- 9 250 MW solar power plants;
- 3 biogas power plants with a capacity of 11.35 MW.

By the end of this year, it is planned to implement eight new renewable energy projects with a total capacity of 163.35 MW. Two wind power plants for 4.95 and 10 MW have been built in Akmola region by Jasil jel LLP; a solar power plant for 20 MW by HEVEL KAZAKHSTAN LLP has been built in Zhambyl region; a 3 MW hydroelectric power plant by «ВЭС Толкын» LLP is under implementation in Almaty region; a 14.9 MW hydroelectric power plant by Baskan Power LLP is under construction in Zhetysu region; A 12.5 MW wind power plant of ERG Capital Project LLP is under implementation in Aktobe region; In the Mangystau region, a 50 MW wind power plant is under construction by Sarkylmas Kuat LLP; in the Atyrau region, a 48 MW wind power plant by «Divitel» LLP is under implementation.

By 2027, the Ministry of Energy plans to hold auctions for the implementation of renewable energy projects for a total installed capacity of more than 4,500 MW of various types of renewable energy generation.

Within the framework of intergovernmental agreements, the Ministry of Energy, together with NWF Samruk-Kazyna JSC, have started implementing renewable energy projects: with Total Energies, 1 GW wind farm in Zhambyl region, Masdar 1 GW wind farm in Zhambyl region, Unigrin Energy 1 GW, 1 GW wind farm project in Zhetysu region. Within the framework of the above projects, it is expected that at least 30 % of domestic-made equipment will be used. Large-scale projects will begin construction and installation work in 2025 [13, P.12].

In 2024, three new renewable energy facilities with a total capacity of 34.75 MW were commissioned. This was made possible by attracting investments in the amount of 13.7 billion tenge. Five more facilities with a total capacity of 128.4 MW are expected to be completed by the end of the year, which will further strengthen the country's energy potential.

Currently, there are 148 renewable energy facilities in Kazakhstan with a total installed capacity of 2903.7 MW. These facilities play a key role in reducing the carbon footprint and provide the country's energy system with clean and sustainable energy [14, P.1].

In 2024, the share of renewable energy sources in total electricity generation in Kazakhstan amounted to 6.4 % (7.58 billion kWh). 8 new projects with a total capacity of 163 MW were commissioned [15, P.1].

An intergovernmental agreement has been signed with the People's Republic of China on the implementation of renewable energy projects, under which it is planned to build renewable energy facilities with a total capacity of 1.8 GW. In accordance with this agreement, it is possible to include additional renewable energy projects in the outline of the intergovernmental agreement [16, P.2].

Results and discussion

During Kazakhstan's transition to green technologies, several infrastructural problems arise. One of the main reasons is the lack of modern equipment and high initial costs for the construction of new facilities, which can become a serious obstacle to the rapid introduction of renewable energy sources. In addition, remote and rural areas of the country may lack the necessary logistics for efficient energy distribution, which limits access to renewable sources and reduces their economic efficiency. It is also important to note that the lack of experience and qualified specialists in the field of green technologies can slow down the process of transition to sustainable energy.

Addressing these challenges in the future will require significant investments in energy infrastructure modernization, including the construction and renovation of power grids to integrate renewable energy sources. It is also necessary to

encourage private and public investment in the development and implementation of new technologies by providing support through subsidies and tax incentives for the first stages of construction. It is important to develop logistics for efficient energy distribution, especially in remote regions, and ensure access to green energy for all citizens. Finally, significant efforts should be directed towards training qualified specialists in the field of green technologies, which will help accelerate innovation and increase the efficiency of the transition to sustainable energy [17, p.2].

According to a report by the International Energy Agency, renewable energy sources will become the largest source of electricity in the world in 2022–2027. Their share in the global energy mix will reach 38 %, thereby reducing the share of coal, natural gas, nuclear energy and oil. The transition to renewable energy sources opens up new prospects for digital innovations designed to solve global energy problems.

The intensive development of the alternative energy sector in Kazakhstan has become possible thanks to the support and long-term financing from international financial institutions. One of the key partners in this process is the Asian Infrastructure Investment Bank (AIIB), which actively cooperates with Kazakhstan to use the potential of the country's natural resources in the development of renewable energy sources. A striking example of the AIIB's participation in a green energy project is the Zhanatas wind power plant in Southern Kazakhstan.

This is the first AIIB project in the country, with a total capacity of 100 MW and an annual output of about 320 million kWh. The plant annually reduces about 250,000 tons of carbon dioxide emissions, which is a significant contribution to reducing the country's carbon footprint [18, P.2].

There are several unique and interesting features of financing renewable energy projects in Kazakhstan, in particular, Kazakhstan offers state support to renewable energy projects in the form of tax incentives, customs preferences and simplified licensing procedures. Depending on the type of investment, the Business Code provides, in particular, the following investment preferences:

- 1 exemption from customs duties and value added tax on import;
- 2 government subsidies.

According to the Concept of the Investment Policy of the Republic of Kazakhstan until 2026, despite the global crisis, Kazakhstan remains attractive to foreign investors and is the undisputed leader in the inflow of foreign investment in the Central Asian region. However, in order to maintain and strengthen this position in the current geo-economic and geopolitical conditions, Kazakhstan needs to actively take the initiative in the fight for foreign investment and create the most optimal conditions for investors.

List of legislative acts adopted in the implementation of the law on renewable energy support:

- «On the definition of a settlement and financial center for the support of renewable energy» (Crane work project (CWP) №1281 dated 11/29/2013);
- «On approval of the Rules for monitoring the use of renewable energy sources» (CWP №1529 dated 05.10.2009);
- «On approval of the Rules for determining the nearest point of connection to electric or thermal networks and connection of renewable energy facilities» (CWP №119 dated 19.01.2012);
- «On approval of the Rules for determining fixed tariffs» (CWP №271 dated 03/27/2014);
- «On approval of the Rules for determining the tariff for renewable energy support» (CWP №290 dated 04/01/2014);
- «On approval of fixed tariffs» (CWP №645 dated 12.06.2014);
- «On approval of a fixed tariff for projects of solar power plants using photovoltaic modules based on Kazakh silicon (Kaz PV) for the conversion of solar radiation energy» (CWP №644 dated 06/12/2014);
- «On approval of tariffs not exceeding the selling price level set out in the feasibility study of the construction project for the use of renewable energy, approved and agreed with the authorized or local executive body, and its validity period in accordance with the feasibility study for energy-producing organizations using renewable energy» (CWP №419 dated 30.04.2014); [19, P.4-5].

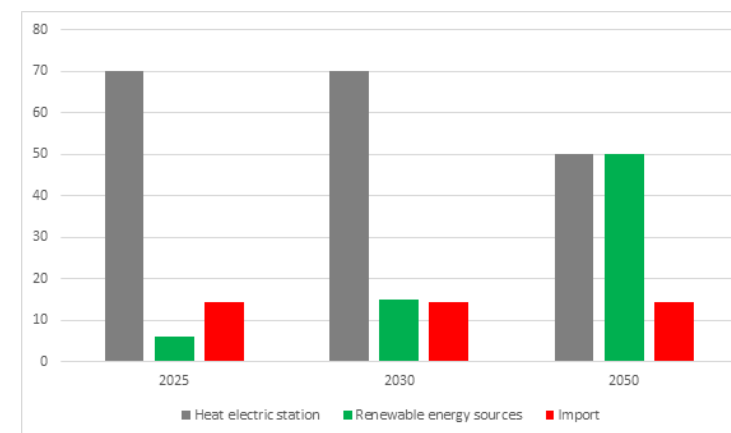


Figure 2 – Forecast of the energy consumption ratio

According to the report of KEGOC JSC dated 08/13/2024, electricity consumption in Kazakhstan has increased by 2.3 billion kWh over the past year, which corresponds to an increase of 3.9% [20, p.2]. This growth reflects a natural increase in electricity needs against the background of the country's population

growth. It should be noted that in the future, with the development of renewable energy sources (RES), electricity production at thermal power plants (CHP) may decrease, especially by 2050 (Fig. 2), which will lead to a change in the country's energy balance and the need for new approaches to ensuring sustainable energy supply. The growth of renewable energy sources, respectively, leads to a reduction in fuel use, therefore, all this together will be reflected in ensuring the eco-system as a whole.

Conclusion

Thus, emphasizing the importance of energy transformation for the sustainable development of the country, it is necessary to assess how green technologies can change the future of Kazakhstan if existing barriers are overcome and strategic initiatives are implemented.

Kazakhstan's energy transformation is an important and urgent process that will determine the country's sustainable development in the face of global challenges such as climate change and the depletion of fossil resources. The transition to green technologies and the introduction of renewable energy sources is not only an environmental necessity, but also an important step towards diversifying Kazakhstan's energy sector, reducing carbon emissions and improving economic sustainability.

Green technologies such as solar, wind and biomass energy have significant potential for Kazakhstan due to its geographical location and growing investments in this sector. In the future, Kazakhstan may well take a leading position in Central Asia as a producer of clean energy, attracting foreign investment and stimulating the creation of new jobs.

However, there are serious challenges on the way to the successful implementation of energy transformation, such as the need to modernize infrastructure, develop logistics and train specialists. These challenges require an integrated approach, cooperation between public and private entities, as well as significant investments in technology and infrastructure.

The advantages of switching to sustainable energy are obvious, reducing dependence on hydrocarbon sources, improving the environmental situation, creating new economic opportunities and attracting foreign investment. Kazakhstan will have to implement an energy transformation that may well provide the country with a sustainable future and an important contribution to global efforts to combat climate change.

REFERENCES

1 Эксперты обсудили возможности и перспективы зеленых технологий в контексте угольной генерации. // DKN Word News «Экономика». [16.06.2022]

<https://dknews.kz/ru/ekonomika/240870-eksperty-obsudili-vozmozhnosti-i-perspektivy-zelenyh>

2 Зеленая экономика: реалии и перспективы в Казахстане, АО «Фонд национального благосостояния «Самрук-Қазына», 2018.

3 Модернизация энергетики Казахстана: вызовы и перспективы. // Официальный информационный ресурс Премьер-министра Республики Казахстан. [28.11.2024]

4 <https://primeminister.kz/ru/news/parlam/modernizatsiya-energetiki-kazakhstana-vyzovy-i-perspektivy>

5 Энергетический сектор Казахстана: состояние и видение страны с учетом международных тенденций, Н. Буркитбаев, YESSENOV SCIENCE JOURNAL №1 (46)-2024, 110-122.

6 Выбросы углерода в мире увеличились на 2,1% в 2023 году // Информационный портал по «зеленой» энергетике «Qazaq Green» [03.10.2024]. <https://qazaqgreen.com/news/world/2305/>

7 «Зеленые» финансы Казахстана: эксперты Power Tech 2025 назвали сумму, необходимую для достижения углеродной нейтральности к 2060 году. // Казахстанский аналитический журнал «Petroleum» [02-04.04.2025].

8 https://www.petroleumjournal.kz/index.php?p=press-more&owner_id=21&id=1612&outlang=1

9 Казахстан начал год с профицита электроэнергии // Международное общественно-политическое издание «Курсив» [06.01.2025] <https://kz.kursiv.media/2025-01-06/zhnb-kzelectroprofit/>.

10 Kazakhstan 2041: the Next Twenty-Five Years. // S.Frederick Starr, Johan Engvall, Svante E. Cornell. Central Asia-Caucasus Institute & Silk Road Studies Program, 2016. ISBN: 978-91-86635-97-8. Printed in Singapore.

11 До 2025 года в Казахстане запустят 40 новых проектов по возобновляемым источникам энергии // Veche.kz [03.08.2022] – <https://veche.kz/ru/article/do-2025-goda-v-kazahstane-zapustiat-40-novyh-proektov-po-vozobnovliaemym-istochnikam-energii.html>.

12 Казахстан на пути к зеленой экономике // Казахстанский институт стратегических исследований при Президенте Республики Казахстан [19.12.2024] – <https://kisi.kz/ru/kazakhstan-na-puti-k-zelenoj-ekonomike/>.

13 Ветроэнергетика в Казахстане: путь к устойчивому энергетическому будущему. // Arasha.kz -информационно-правовой портал [18.02.2024] <https://arasha.kz/ru/jenergiya/vetrojenergetika-v-kazahstane-put-k-ustojchivomu-jenergeticheskomu-budushhemu/>

14 Как развивается казахстанская биогазовая энергетика? // Информационный портал Eenergy.media [11.03.2020] <https://eenergy.media/news/14054>.

15 [Как Казахстан модернизирует энергетику: ключевые проекты 2024 года](https://www.inbusiness.kz/ru/news/kak-kazahstan-moderniziruet-energetiku-klyuchevye-proekty-2024-goda) // Медиахолдинг «Atameken Business» [19.12.2024] <https://www.inbusiness.kz/ru/news/kak-kazahstan-moderniziruet-energetiku-klyuchevye-proekty-2024-goda>

16 [Сколько объектов ВИЭ построили в Казахстане в 2024 году](https://vcentre.kz/2024/12/21/skolko-obektov-vije-postroili-v-kazahstane-v-2024-godu/) // Информационный портал «Новости Центрального Казахстана» [21.12.2024] <https://vcentre.kz/2024/12/21/skolko-obektov-vije-postroili-v-kazahstane-v-2024-godu/>

17 Минэнерго: в 2025 году в Казахстане введут в эксплуатацию девять проектов ВИЭ // Информационный портал по «зеленой» энергетике «Qazaq Green» [26.02.2025] <https://qazaqgreen.com/news/kazakhstan/2589/>

18 Зеленая энергетика в Казахстане: новый завод обеспечит экспорт и рабочие места // Информационный портал «Tengri News» [17.01.2025] https://tengrinews.kz/kazakhstan_news/zelenaya-energetika-kazahstane-novyy-zavod-obespechit-560010/

19 Вперед в будущее. Перспективы развития зелёной энергетики в Казахстане // Информационный портал «Tengri News» [14.06.2023] – <https://tengrinews.kz/internet/vpered-budushee-perspektivy-razvitiya-zelnoy-energetiki-502030/>

20 Какие проекты будет финансировать Азиатский банк инфраструктурных инвестиций // Центр деловой информации «Капитал» [20.02.2024] – <https://kapital.kz/finance/123299/kakiye-proyekty-budet-finansirovat-aziat-skiy-bank-infrastrukturnykh-investitsiy.html>

21 Система поддержки ВИЭ в Казахстане. // Министерство энергетики Республики Казахстан. – https://unece.org/fileadmin/DAM/energy/se/pp/gee21/Workshop_Israel_Feb_15/9_KazakhstanKulanbayRus.pdf

22 Производство электроэнергии в Казахстане за год выросло почти на 4 % // ТОО «Kazakhstan Today Media Group» [13.08.2024] – https://www.kt.kz/rus/ekonomika/proizvodstvo_elektroenergii_v_kazahstane_za_god_vyroslo_1377967687.html

REFERENCES

1 Eksperty obsudili vozmozhnosti i perspektivy zelenykh tekhnologiy v kontekste ugol'noy generatsii. // Novosti DKN Word «Ekonomika». [16.06.2022]. [Experts discussed the possibilities and prospects of green technologies in the context of coal generation // Novosti DKN Word «Ekonomika» [16.06.2022]] <https://dknews.kz/ru/ekonomika/240870-eksperty-obsudili-vozmozhnosti-i-perspektivy-zelenyh>

2 Zelenaya ekonomika: realii i perspektivy v Kazakhstane, AO «Fond natsional'nogo blagosostoyaniya «Samruk-Kazyna», 2018. [Green Economy: Realities and Prospects in Kazakhstan, JSC National Welfare Fund Samruk-Kazyna, 2018].

3 Modernizatsiya energetiki Kazakhstana: vyzovy i perspektivy. // Ofitsial'nyy informatsionnyy resurs Prem'yer-ministra Respubliki Kazakhstan [28.11.2024]. [Modernization of Kazakhstan's energy sector: challenges and prospects. // Official information resource of the Prime Minister of the Republic of Kazakhstan 28.[11.2024]].

4 – <https://primeminister.kz/ru/news/parlam/modernizatsiya-energetiki-kazakhstana-vyzovy-i-perspektivy>.

5 Energeticheskoy sektor Kazakhstana: sostoyaniye i videniye strany s uchetom mezhdunarodnykh tendentsiy, N. Burkitbayev, YESSNOV SCIENCE JOURNAL №1 (46)-2024, 110-122. [Energy sector of Kazakhstan: state and vision of the country taking into account international tendencies, N. Burkitbayev, YESSNOV SCIENCE JOURNAL №1 (46)-2024, 110-122].

6 Vybrosty ugleroda v mire uvelichilis' na 2,1% v 2023 godu. // Informatsionnyy portal po «zelenoy» energetike «Qazaq Green» [03.10.2024]. [Global carbon emissions increased by 2.1% in 2023. // Information portal on «green» energy «Qazaq Green» [03.10.2024]] – <https://qazaqgreen.com/news/world/2305/>.

7 «Zelenyye» finansy Kazakhstana: eksperty Power Tech 2025 nazvali summu, neobkhodimuyu dlya dostizheniya uglerodnoy neytral'nosti k 2060 godu. // Kazakhstanskiy analiticheskiy zhurnal «Petroleum» [02-04.04.2025]. [[«Green» finances of Kazakhstan: Power Tech 2025 experts named the sum to be spent on achieving carbon neutrality by 2060. // Kazakhstan analytical journal «Petroleum» \[02-04.04.2025\]\] https://www.petroileumjournal.kz/index.php?p=press-more&owner_id=21&id=1612&outlang=1](https://www.petroileumjournal.kz/index.php?p=press-more&owner_id=21&id=1612&outlang=1)

8 azakhstan nachal god s profitsita elektroenergii // Mezhdunarodnoye obshchestvenno-politicheskoye izdaniye «Kursiv» [06.01.2025]. [Kazakhstan started the year with an electricity surplus // International socio-political publication «Kursiv» [06.01.2025]] <https://kz.kursiv.media/2025-01-06/zhnb-kzelectroprofit/>

9 Kazakhstan 2041: the Next Twenty-Five Years. // S.Frederick Starr, Johan Engvall, Svante E. Cornell. Central Asia-Caucasus Institute & Silk Road Studies Program, 2016. ISBN: 978-91-86635-97-8. Printed in Singapore.

10 Do 2025 goda v Kazakhstane zapustyat 40 novykh proyektov po vozobnovlyayemym istochnikam energii // Vecher.kz [03.08.2022]. [By 2025, 40 new renewable energy projects will be launched in Kazakhstan // Vecher.kz [03.08.2022]] <https://vecher.kz/ru/article/do-2025-goda-v-kazahstane-zapustiat-40-novykh-proyektov-po-vozobnovliaemym-istochnikam-energii.html>

11 Kazakhstan na puti k zelenoy ekonomike // Kazakhstanskiy institut strategicheskikh issledovaniy pri Prezidente Respubliki Kazakhstan [19.12.2024]. [Kazakhstan on the way to a green economy // Kazakhstan Institute for Strategic Studies under the President of the Republic of Kazakhstan [19.12.2024]] <https://kisi.kz/ru/kazakhstan-na-puti-k-zelenoy-ekonomike/>

12 Vetroenergetika v Kazakhstane: put' k ustoychivomu energeticheskomu budushchemu. // Arasha.kz -informatsionno-pravovoy portal [18.02.2024]. [Wind energy in Kazakhstan: the path to a sustainable energy future. // Arasha.kz – information and legal portal [18.02.2024]] <https://arasha.kz/ru/jenergiya/vetrojenergetika-v-kazakhstane-put-k-ustoychivomu-jenergeticheskomu-budushhemu/>

13 Kak razvivayetsya kazakhstanskaya biogazovaya energetika? // Informatsionnyy portal «energy.media» [11.03.2020]. [How is Kazakhstan's biogas energy developing? // Information portal «energo.media» [11.03.2020]] <https://energy.media/news/14054>

14 Kak Kazakhstan moderniziruyet energetiku: klyuchevyye proyekty 2024 goda // Mediakholding «Atameken Business» [19.12.2024]. [How Kazakhstan is modernizing its energy sector: key projects for 2024 // Atameken Business Media Holding [19.12.2024]] <https://www.inbusiness.kz/ru/news/kak-kazakhstan-moderniziruet-energetiku-klyuchevyye-proekty-2024-goda>

15 Skol'ko ob'yektov VIE postroili v Kazakhstane v 2024 godu // Informatsionnyy portal «Novosti Tsentral'nogo Kazakhstana» [21.12.2024]. [How many renewable energy projects have been built in Kazakhstan in 2024 // Information portal «News of the Central Kazakhstan» [21.12.2024]] <https://vcentre.kz/2024/12/21/skolko-obektov-vije-postroili-v-kazakhstane-v-2024-godu/>

16 Minenergo: v 2025 godu v Kazakhstane vvedut v ekspluatatsiyu devyat' proyektov VIE // Informatsionnyy portal po «zelenoy» energetike «Qazaq Green» [26.02.2025]. [Ministry of Energy: Nine renewable energy projects to be commissioned in Kazakhstan in 2025 // Information portal on green energy «Qazaq Green» [26.02.2025]]

17 <https://qazaqgreen.com/news/kazakhstan/2589/>

18 Zelenaya energetika v Kazakhstane: novyy zavod obespechit eksport i rabochiye mesta // Informatsionnyy portal «Tengri News» [17.01.2025]. [Green energy in Kazakhstan: new plant ensures exports and jobs // Information portal «Tengri News» [17.01.2025]] – https://tengrinews.kz/kazakhstan_news/zelenaya-energetika-kazakhstane-novyy-zavod-obespechit-560010/

19 Vpered v budushcheye. Perspektivy razvitiya zelonoy energetiki v Kazakhstane // Informatsionnyy portal «Tengri News» [14.06.2023]. [Forward to the Future. Prospects for Development of Bailer Energy in Kazakhstan //

Information Portal «Tengri News» [14.06.2023]] – <https://tengrinews.kz/internet/vpered-budushee-perspektivyi-razvitiya-zelnoy-energetiki-502030/>

20 Kakiye proyekty budet finansirovat' Aziatskiy bank infrastrukturykh investitsiy // Tsentr delovoy informatsii «Kapital» [20.02.2024]. [What projects will the Asian Infrastructure Investment Bank finance // Business Information Center «Kapital» [20.02.2024]] – <https://kapital.kz/finance/123299/kakiye-proyekty-budet-finansirovat-aziat-skiy-bank-infrastrukturykh-investitsiy.html>

21 Sistema podderzhki VIE v Kazakhstane. // Ministerstvo energetiki Respubliki Kazakhstan. [Renewable Energy Support System in Kazakhstan. // Ministry of Energy of the Republic of Kazakhstan]

22 https://unece.org/fileadmin/DAM/energy/se/pp/gee21/Workshop_Israel_Feb_15/9_KazakhstanKulanbayRus.pdf

23 Proizvodstvo elektroenergii v Kazakhstane za god vyroslo pochni na 4 % // TOO «Kazakhstan Today Media Group» [13.08.2024]. [Electricity production in Kazakhstan has grown by almost 4 % in a year // «Kazakhstan Today Media Group» LLP 13.08.2024]

24 https://www.kt.kz/rus/ekonomika/proizvodstvo_elektroenergii_v_kazakhstane_za_god_vyroslo_1377967687.html

Received 23.05.25

Received in revised form 27.08.25

Accepted for publication 05.09.25

Н. И. Даримбаева¹, *М. Ш. Сакиджанов²,

Ж. Ж. Тойгожинова³, М. Б. Жаркымбекова⁴

^{1,2,3,4} Ғұмарбек Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.

23.05.25 ж. баспаға түсті.

27.08.25 ж. түзетулерімен түсті.

05.09.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

ҚАЗАҚСТАННЫҢ ЭНЕРГЕТИКАЛЫҚ ТРАНСФОРМАЦИЯСЫ: ЖАСЫЛ ТЕХНОЛОГИЯЛАР БОЛАШАҚТЫ ҚАЛАЙ ӨЗГЕРТЕ АЛАДЫ

Мақала Қазақстандағы энергетикалық трансформацияға арналған, электр энергиясын тұтынудың өсуі жағдайында тұрақты энергия көздеріне көшу қажеттілігіне және көмір энергетикасына тәуелділікпен байланысты экологиялық проблемаларға назар аударады. Мәтінде көміртегі шығарындыларын азайту және

жаңартылатын энергия көздеріне көшу сияқты жаһандық үрдістер, сондай-ақ Қазақстанның осы үдерістердегі ролі қарастырылған. Мақалада елдің энергетикалық инфрақұрылымының ағымдағы мәселелері, соның ішінде жылу желілерінің тозуының жоғары деңгейі және жаңғырту қажеттілігі талданады, сондай-ақ күн, жел және биомасса энергетикасы сияқты жасыл технологиялардың даму перспективалары қарастырылады. Жаңартылатын энергетика саласындағы жобаларды қаржылық қолдауға, сондай-ақ инновациялық технологияларды енгізу арқылы елдің экологиялық ахуалды жақсарту және экономикалық өсу мүмкіндіктеріне ерекше назар аударылды. Қорытындылай келе, Қазақстанның Тұрақты энергетикалық болашағына қол жеткізу үшін инфрақұрылымды дамыту, мамандарды оқыту және инвестициялар тарту маңыздылығы атап өтіледі.

Кілтті сөздер: Жаңартылатын энергия көздері (ЖЭК), энергетикалық трансформация, жасыл технологиялар, күн және жел станциялары.

Н. И. Даримбаева¹, *М. Ш. Сакитжанов²,

Ж. Ж. Тойгожинова³, М. Б. Жаркымбекова⁴

Алматынський университет энергетикası және связи имени Гумабека Даукеева,
Республика Казахстан, г. Алматы

Поступило в редакцию 23.05.25

Поступило с исправлениями 27.08.25

Принято в печать 05.09.25

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ КАЗАХСТАНА: КАК ЗЕЛЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ МОГУТ ИЗМЕНИТЬ БУДУЩЕЕ

Статья посвящена энергетической трансформации в Казахстане, акцентируя внимание на необходимости перехода к устойчивым источникам энергии в условиях растущего потребления электроэнергии и экологических проблем, связанных с зависимостью от угольной энергетики. В тексте рассмотрены глобальные тенденции, такие как снижение углеродных выбросов и переход к возобновляемым источникам энергии, а также роль Казахстана в этих процессах. В статье анализируются текущие проблемы энергетической инфраструктуры страны, включая высокий уровень износа тепловых сетей и необходимость модернизации, а также рассматриваются перспективы и вызовы развития зеленых технологий, таких как солнечная, ветровая и биомассовая энергетика.

Особое внимание уделено финансовой поддержке проектов в области возобновляемой энергетики, а также возможностям для страны в улучшении экологической ситуации и экономическом росте через внедрение инновационных технологий. В заключение подчеркивается важность дальнейших усилий по развитию инфраструктуры, обучению специалистов и привлечению инвестиций для достижения устойчивого энергетического будущего Казахстана.

Ключевые слова: Возобновляемые источники энергии (ВИЭ), энергетическая трансформация, зеленые технологии, солнечные станции, ветровые станции.

<https://doi.org/10.48081/FQLZ6648>

Р. М. Дюсова¹, Е. А. Жакманова², Г. Ж. Сейтенова³

¹Торайғыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар.;

²Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева, Республика Казахстан, г. Астана.;

³Объединение юридических лиц «Ассоциация производителей и потребителей нефтегазохимической продукции (Нефтегазохимическая Ассоциация)», Республика Казахстан, г. Астана.

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3083-5255>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0545-5912>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6202-3951>

*e-mail: rizagul.dyussova@gmail.com

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ И РЕЖИМОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ КАТАЛИТИЧЕСКОГО РИФОРМИНГА

В условиях роста стоимости энергоресурсов и ужесточения экологических требований вопросы повышения энергоэффективности становятся ключевыми для процессов каталитического риформинга, являющегося важнейшей технологией в производстве высокооктановых бензинов, ароматических углеводородов и сырья для нефтегазохимии. Настоящая работа направлена на исследование возможностей оптимизации тепловых потоков и режимов работы оборудования с целью снижения удельного энергопотребления без проведения масштабной реконструкции установок. На основе данных действующей установки каталитического риформинга проведён тепловой и энергетический анализ, рассчитан тепловой баланс, определены потери теплоты, а также проанализирована эффективность водородной циркуляции. Построена математическая модель процесса с возможностью варьирования ключевых параметров (температура, давление, расход сырья и ВСТ), состава сырья. В результате моделирования показано, что внедрение перекрестных теплообменников, закрытие водородного цикла и стабилизация температурных режимов позволяет снизить энергопотребление на 6–7 %, повысить эффективность использования водорода и

стабилизировать качество реформата. Полученные результаты подтверждают целесообразность применения комплексного подхода к энергоэффективности риформинга и соответствуют международной практике в области устойчивого развития нефтепереработки. Разработанный подход может быть использован в качестве основы для создания цифровых инструментов мониторинга и оптимизации технологических параметров в режиме реального времени.

Ключевые слова: энергоэффективность, каталитический риформинг, режим работы, параметры, тепловой поток

Введение

Каталитический риформинг является ключевым процессом в нефтепереработке, обеспечивая производство высокооктановых компонентов бензина и ценных ароматических углеводородов. Значимость возрастает в условиях повышения требований к качеству моторных топлив и необходимостью повышения рентабельности переработки нефти. Однако данный процесс также характеризуется высокой энергоемкостью, связанной с необходимостью поддержания высоких температур и обеспечением достаточной циркуляции водорода для предотвращения коксования катализатора.

В современных условиях нефтеперерабатывающая отрасль сталкивается с рядом вызовов, включая рост стоимости энергоресурсов, ужесточение экологических норм и необходимость устойчивого развития. Это требует внедрения эффективных технических решений, направленных на снижение удельного энергопотребления и повышение ресурсоэффективности производственных процессов. В частности, оптимизация тепловых потоков и рациональное управление водородной циркуляцией позволяют существенно повысить энергоэффективность установок риформинга без масштабной реконструкции оборудования.

Международный опыт показывает, что внедрение интегрированных теплообменных схем и технологий рекуперации теплоты, а также цифровизация и моделирование технологических режимов, способны сократить энергопотребление на 5–10% и повысить энергетическую эффективность. Однако практическая реализация этих решений требует учета специфики сырья, характеристик установок и условий эксплуатации на конкретных НПЗ.

Цель настоящей работы – исследовать возможности повышения энергоэффективности процессов каталитического риформинга за счёт оптимизации теплового баланса. В статье представлены методика расчета тепловых потоков, анализ текущих потерь, а также предложены направления

для технологической оптимизации с учётом современных подходов к управлению тепловыми и водородными ресурсами.

Энергоэффективность процессов каталитического риформинга является одним из приоритетных направлений в нефтеперерабатывающей промышленности, так как данный процесс традиционно потребляет значительные объёмы топлива и водорода для поддержания высокой температуры реакций и предотвращения коксования катализатора.

Исследования последних лет подчеркивают важность тепловой интеграции, цифрового моделирования и управления водородным циклом как ключевых направлений повышения энергоэффективности [1]. В частности, по данным [2], внедрение схем внутреннего рекуперационного теплообмена позволяет сократить потребление тепла до 15–18% при стабильном выходе риформата. Это достигается за счет оптимального распределения тепловых потоков между реакторами, печами и теплообменниками.

Другие исследователи [3] акцентируют внимание на важности оптимизации водородной циркуляции. Избыточный поток водорода снижает эффективность реакций дегидроциклизации, а недостаточный – приводит к закоксовыванию катализатора.

В ряде работ [4; 5] применялись методы эксергетического анализа для оценки потенциальных зон энергетических потерь в риформинге. Авторы показали, что наибольшие потери приходятся на печи подогрева и стадии охлаждения продукта, что делает обоснованным применение теплообменных сетей с гибкой регулировкой потоков.

Дополнительно, в исследовании [6] рассматривается влияние состава сырья на тепловую нагрузку и эффективность каталитических реакций. В частности, сырьё с высоким содержанием парафинов требует большего теплового ввода для инициации дегидроциклизации, но также потенциально дает более высокий выход ароматических соединений при надлежащем управлении температурным режимом.

Таким образом, ключевыми подходами, подтвержденными международной практикой и научной литературой, являются:

- оптимизация тепловых потоков внутри установок риформинга;
- управление параметрами водородного цикла;
- учет состава сырья при расчетах теплового баланса;
- применение цифровых и гибридных моделей для настройки режимов;
- оценка эффективности через показатели эксергии и удельного энергопотребления.

В следующем разделе будет представлена методика теплового анализа и моделирования с учётом условий работы отечественного НПЗ и специфики перерабатываемого сырья

Материалы и методы

Характеристика установки и сырья. Исходной основой послужили реальные данные установки риформинга на отечественном НПЗ. Входным сырьём является стабильный нафтовый дистиллят с варьирующимся содержанием парафиновых и нафтеновых углеводородов. Были использованы хроматографические данные для построения компонентного состава фракций (рис. 1; 2).

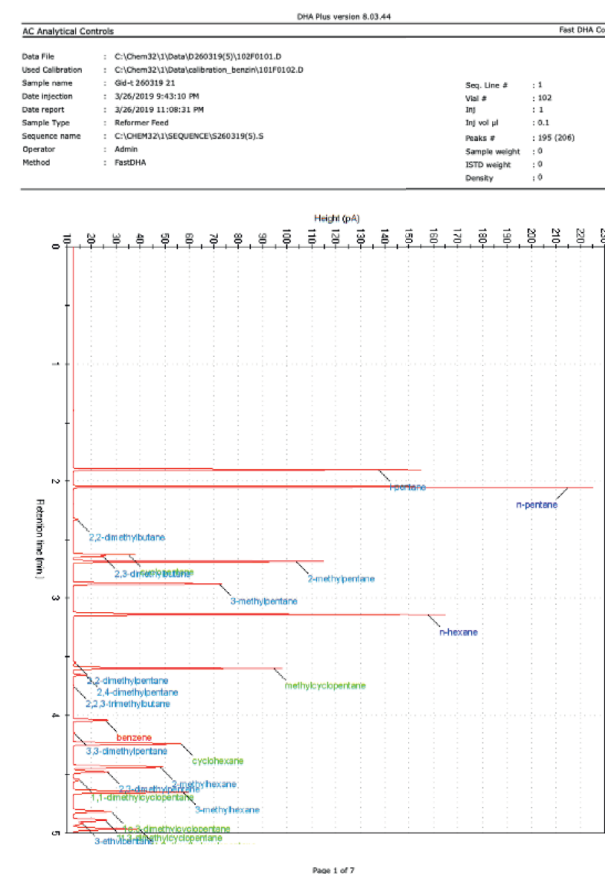


Рисунок 1 – Хроматографические данные по составу сырья

Определение теплового баланса. Тепловой баланс рассчитывался с использованием первого закона термодинамики. Входящие и выходящие тепловые потоки определялись на основании следующих данных:

температура и массовый расход сырья и продуктов;
теплота реакций (энтальпии превращений);
расход топлива в печах подогрева;
потери тепла в окружающую среду.
Расчеты проводились по уравнению:

$$Q_{\text{вход}} + Q_{\text{реакции}} = Q_{\text{продуктов}} + Q_{\text{потерь}} + Q_{\text{выхлопа}}$$

Показатель удельного энергопотребления (UEP) рассчитывался как отношение общего потребления энергии (включая топливо, пар и электроэнергию) к количеству произведенного риформата:

$$UEP = E_{\text{total}} \backslash \text{тонн риформата}$$

Для оценки теплового эффекта процесса риформинга (в частности, реакций дегидроциклизации и изомеризации), использовали:

$$\Delta H_{\text{реакции}} = \sum v_i H_f^0(\text{продукты}) - \sum v_i H_f^0(\text{реагенты})$$

где, H_f^0 – стандартная энтальпия образования (кДж/моль),
 v_i – стехиометрические коэффициенты.

Термодинамический анализ реакций проводится для определения возможности протекания той или иной стадии. Термодинамические исследования процессов, которые могут протекать в реакторе, основаны на использовании констант равновесия химических реакций, которые рассчитываются по справочным данным. Проводится расчет энергий Гиббса ΔG , констант равновесия реакций K_p , энтальпии (ΔH) и энтропии (ΔS) реакций:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S, \quad \ln(K_p) = -\frac{\Delta G}{RT}. \quad (1)$$

Для подтверждения возможности протекания перечисленных реакций был выполнен термодинамический анализ.

В таблице 1 приведены значения энергии Гиббса и константы равновесия основных реакций процесса каталитического риформинга

Таблица 1 – Среднее значение термодинамических характеристик реакций в процессе каталитического риформинга бензинов (при $T = 753 \text{ K}$, $P = 1,6 \text{ МПа}$)

№	Реакция	Энергия Гиббса, кДж/моль
1	Гидрокрекинг нормальных парафинов	-50,96
2	Изомеризация нормальных парафинов	-1,42
3	Изомеризация изо-парафинов	-3,72
4	Дегидроциклизация нормальных парафинов (н-П→Н-6)	-5,36
5	Гидрокрекинг изо-парафинов	-60,83
6	Дегидроциклизация изо-парафинов (н-П→Н-6)	-4,98
7	Гидрокрекинг нафтен-5 (Н-5→и-П)	-3,51
8	Изомеризация нафтен-6 (Н-6→Н-5)	-2,13
9	Дегидрирование нафтен-6	-97,53
10	Гидрирование ароматических углеводородов	66,90
11	Дегидроциклизация нормальных парафинов (н-П→Н-5)	-4,85
12	Дегидроциклизация изо-парафинов (н-П→Н-5)	-7,32
13	Изомеризация нафтен-5	-17,69
14	Гидрокрекинг нафтен-5 (Н-5→н-П)	-10,84
15	Коксообразование (Ар → НППУ)	-6,67
16	Коксообразование (Н-5 → НППУ)	-19,38
17	Коксообразование (НППУ → Кокс)	-1,47
18	Гидрирование (НППУ → Ар)	-12,4

Была построена расчетная модель в Pascal с возможностью варьирования параметров:

- температура сырья и продуктов;
- концентрация водорода;
- состав сырья;
- теплотери на участках установки.
- Сценарии включали:
- базовый режим (фактический);
- предложенный режим с перераспределением тепловых потоков;
- оптимизированный режим с внедрением дополнительных теплообменников.

Проведен анализ чувствительности модели к изменению ключевых параметров – температуры в реакторах, составу сырья и расхода сырья и ВСГ.

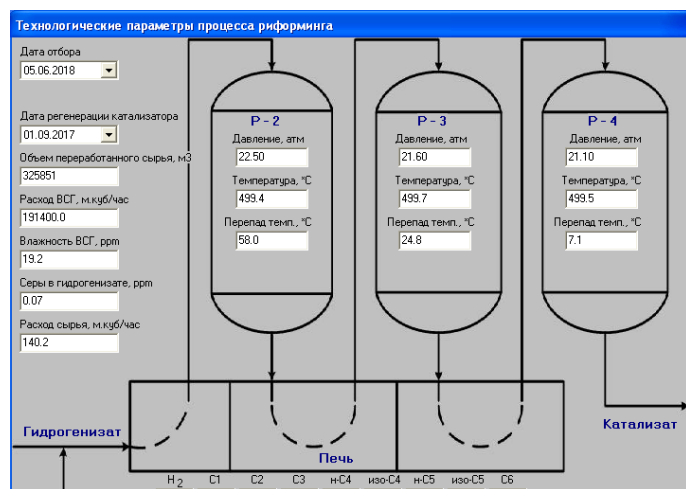


Рисунок 2 – Технологические параметры процесса риформинга

Результаты и обсуждение

В рамках проведённого исследования был выполнен анализ текущих режимов работы каталитического риформинга с акцентом на потребление тепловой энергии, степень рекуперации в теплообменной сети, а также использование водородсодержащего газа в циркуляционном контуре.

Базовые параметры технологического режима были взяты с действующей установки. Установлено, что:

- Потери теплоты на стадии подогрева сырья составляют до 18–22 % от общего теплового баланса.
- Удельный расход тепла на 1 т сырья варьируется от 1,8 до 2,2 Гкал/т при недостаточной интеграции теплообменных аппаратов.

Водородный контур не полностью закрыт – часть водорода теряется при продувке, что снижает эффективность риформинга и увеличивает энергонагрузку.

Была составлена модель с применением инструмента теплового баланса, где варьировались следующие параметры:

- Температура подачи сырья
- Расход сырья
- Давление в трех реакторах
- Расход водородсодержащего газа

Оптимизация теплообменной сети (введение перекрестного теплообменника сырьё–продукт) позволила снизить внешний подвод тепла на 12,7 %.

Модернизация схемы циркуляции водорода с добавлением водородосберегающего сепаратора повысила водородную эффективность на 17 %, что также привело к снижению удельного энергопотребления на 6,3%.

Внедрение регламентов по поддержанию постоянной температуры на выходе из реакторов позволило стабилизировать октановое число реформата при меньших температурных колебаниях, снижая тепловые потери.

Результаты сопоставимы с аналогичными исследованиями:

В работе [2] показано снижение энергозатрат на 15% за счёт комплексной тепловой интеграции и замкнутого водородного контура.

В исследовании [7; 8; 9; 10] сообщается о повышении выхода ароматических углеводородов на 6–8% при использовании многоступенчатой теплообменной системы.

Практические рекомендации

Внедрение многоступенчатого предварительного подогрева с использованием горячего реформата и циркулирующего газа;

Автоматизация регулирования подачи сырья и циркулирующего газа для минимизации колебаний температуры;

Повышение степени рекуперации до 75–80 % за счёт реконфигурации теплообменного оборудования;

Закрытие водородного цикла и внедрение системы рекуперации с использованием сепараторов с высокой селективностью.

Информация о финансировании

Данное исследование финансируется в рамках проекта «Жас ғалым» AP19175752 «Научно-техническое обеспечение энергосбережения и ресурсоэффективности технологии приготовления высокооктановых бензинов и ароматических углеводородов» Министерством науки и высшего образования Республики Казахстан.

Выводы

Проведённый анализ и моделирование показали, что оптимизация тепловых потоков и режимов работы оборудования на установках каталитического риформинга позволяет достичь значительного повышения энергоэффективности процесса без необходимости масштабной модернизации установки. Основные выводы:

Снижение удельного энергопотребления на 6–7 % достигается за счёт интеграции теплообменников между потоками сырья и горячего реформата.

Повышение эффективности водородного контура (на 15–20%) позволяет не только сократить потери водорода, но и снизить тепловую нагрузку на рекаторы.

Стабилизация температурных режимов в реакционной зоне приводит к сохранению качества реформата и более равномерной работе катализаторов.

Совокупный эффект от мероприятий по энергосбережению выражается в снижении операционных затрат, увеличении выхода высокооктанового бензина и повышении экологической устойчивости производства.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Доклад Министерства энергетики РК. Актуальное состояние и перспективы развития нефтеперерабатывающей отрасли Казахстана. – Астана : МЭ РК, 2023. – 28 с.

2 **Aghamohammadi, M., Ghaffari, A., Sattari, M.** Multi-objective optimization of a naphtha catalytic reforming unit using NSGA-II and fuzzy decision-making // *Energy*. – 2021. – Vol. 215. – P. 119120. – DOI: – <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119120>.

3 **Al-Fadhli, J., Al-Samhan, M., Bouresli, R., Al-Tarkait, F., Jassem, F.** MoO₃/TiO₂ Hydroisomerization Performance Using n-hexane in Comparison with a Platinum Commercial Catalyst; Pilot Scale // *Journal of Applied Sciences*. – 2020. – Vol. 20, No. 5. – P. 182–190. – DOI: [10.3923/jas.2020.182.190](https://doi.org/10.3923/jas.2020.182.190).

4 **Wu, J., Chen, G., Chen, A., Gao, Z. et al.** Molecular-Level Modeling of Naphtha Continuous Catalytic Reforming Process // *Chemical Engineering Science*. – 2025. – Vol. 309. – Art. 121430. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2025.121430>.

5 **Samad, A., Ahmad, I.** An Intelligent System for Estimation of Exergy Efficiency of Integrated Naphtha and Isomerization Process under Uncertainty // 2022 17th International Conference on Emerging Technologies (ICET), Swabi, Pakistan, 2022. – P. 12–17. – DOI: 10.1109/ICET56601.2022.10004625.

6 **Ivanchina, E. D., Chernyakova, E. S., Pchelintseva, I. V., Poluboyartsev, D. V.** Mathematical modeling and optimization of semi-regenerative catalytic reforming of naphtha // *Oil & Gas Science and Technology – Revue de l'IFP Energies nouvelles*. – 2021. – Vol. 76, No. 2. – Art. 64. – DOI: [10.2516/ogst/2021041](https://doi.org/10.2516/ogst/2021041).

7 **Nanadegani, F. S., Sunden, B.** Review of exergy and energy analysis of fuel cells // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2023. – Vol. 48, Issue 84. – P. 32875–32942. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.05.052>.

8 **Goff, P., Hornut, J.** Exergy Analysis and Exergo-Economic Optimization of Industrial Processes // *Oil & Gas Science and Technology – Revue de l'Institut Français du Pétrole*. – 1998. – Vol. 53. – P. 99–102. – DOI: [10.2516/ogst.1998011](https://doi.org/10.2516/ogst.1998011).

9 Европейская комиссия. Технологии энергоэффективности в нефтегазовом секторе: отчет Европейской комиссии. Брюссель EC-200/20, 2020.

10 **Глаголева, О. Ф., Пискунов, И. В.** Энергосбережение – приоритетная задача современной нефтегазопереработки // *Neftegaz.RU* № 1(109), 2021.

REFERENCES

1 Doklad Ministerstva energetiki RK. Aktyalnoe sostoyanie i perspektivi razvitiya neftepererabativaushei otrasly Kazahstana. [Report of the Ministry of Energy of the Republic of Kazakhstan. Status and development prospects of the oil refining industry of Kazakhstan.] – Astana : ME RK, 2023. – P. 28.

2 **Aghamohammadi, M., Ghaffari, A., Sattari, M.** Multi-objective optimization of a naphtha catalytic reforming unit using NSGA-II and fuzzy decision-making // *Energy*, 2021. – Vol. 215. – P. 119120. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119120>.

3 **Al-Fadhli, J., Al-Samhan, M., Bouresli, R., Al-Tarkait, F., Jassem, F.** MoO₃/TiO₂ Hydroisomerization Performance Using n-hexane in Comparison with a Platinum Commercial Catalyst; Pilot Scale // *Journal of Applied Sciences*, 2020. – Vol. 20, No. 5. – P. 182–190. DOI: [10.3923/jas.2020.182.190](https://doi.org/10.3923/jas.2020.182.190).

4 **Wu, J., Chen, G., Chen, A., Gao, Z. et al.** Molecular-Level Modeling of Naphtha Continuous Catalytic Reforming Process // *Chemical Engineering Science*, 2025. – Vol. 309. – Art. 121430. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2025.121430>.

5 **Samad, A., Ahmad, I.** An Intelligent System for Estimation of Exergy Efficiency of Integrated Naphtha and Isomerization Process under Uncertainty // 2022 17th International Conference on Emerging Technologies (ICET), Swabi, Pakistan, 2022. – P. 12–17. DOI: [10.1109/ICET56601.2022.10004625](https://doi.org/10.1109/ICET56601.2022.10004625).

6 **Ivanchina, E. D., Chernyakova, E. S., Pchelintseva, I. V., Poluboyartsev, D. V.** Mathematical modeling and optimization of semi-regenerative catalytic reforming of naphtha // *Oil & Gas Science and Technology – Revue de l'IFP Energies nouvelles*, 2021. – Vol. 76, No. 2. – Art. 64. DOI: [10.2516/ogst/2021041](https://doi.org/10.2516/ogst/2021041).

7 **Nanadegani, F. S., Sunden, B.** Review of exergy and energy analysis of fuel cells // *International Journal of Hydrogen Energy*, 2023. – Vol. 48, Issue 84. – P. 32875–32942. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.05.052>.

8 Goff, P., Hornut, J. Exergy Analysis and Exergo-Economic Optimization of Industrial Processes // Oil & Gas Science and Technology – Revue de l'Institut Français du Pétrole, 1998. – Vol. 53. – P. 99–102. DOI: 10.2516/ogst:1998011.

9 Evropeiskaya komissiya. Tekhnologii energoeffektivnosti v neftegazovom sektore: otchet Evropeiskoi komissii. [European Commission. Energy efficiency technologies in the oil and gas sector: report of the European Commission.] Bryussel. – 2020 – EC-200/20.

10 Glagoleva, O. F., Piskunov, I. V. Energosberigenie – prioritetnaya zadacha sovremennoi neftegazopererabotki [Energy saving is a priority task of modern oil and gas processing] // Neftegaz.RU № 1(109) – 2021.

Поступило в редакцию 15.07.25

Поступило с исправлениями 23.07.25

Принято в печать 05.09.25

Р. М. Дюсова¹, Е. А. Жакманова², Г. Ж. Сейтенова³

¹Торайғыров университет, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.

²Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Қазақстан Республикасы, Астана қ.

³«Мұнай-химия өнімдерін өндірушілер мен тұтынушылар қауымдастығы (Мұнай-химия қауымдастығы)» заңды тұлғалар бірлестігі, Қазақстан Республикасы, Астана қ.

15.07.25 ж. баспаға түсті.

23.07.25 ж. түзетулерімен түсті.

05.09.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

КАТАЛИТИКАЛЫҚ РЕФОРМАНУДЫҢ ЭНЕРГЕТИКАЛЫҚ ТИІМДІЛІГІН АРТТЫРУ ҮШІН ЖЫЛУ АҒЫМДАРЫН ЖӘНЕ РЕЖИМДЕРІН ОҢТАМАЛАНДЫРУ

Энергия құнының өсуі және экологиялық талаптардың қатайтылуы жағдайында энергия тиімділігін арттыру мәселелері мұнай-химия өнеркәсібі үшін жоғары октанды бензиндерді, хош иісті көмірсутектерді және шикізатты өндірудегі ең маңызды технология болып табылатын каталитикалық риформинг процестері үшін шешуші мәселеге айналууда. Бұл жұмыс қондырғыларды ауқымды реконструкциялаусыз меншікті энергия шығынын азайту мақсатында жылу ағындары мен жабдықтың жұмыс режимдерін оңтайландыру мүмкіндіктерін зерттеуге бағытталған. Жұмыс істеп тұрған каталитикалық риформинг қондырғысының мәліметтері негізінде

жылу-энергетикалық талдау жүргізілді, жылу балансы есептелді, жылу шығындары анықталды, сутегі айналымының тиімділігі талданды. Негізгі параметрлерді (температура, қысым, шикізат және H₂S шығыны) және шикізат құрамын өзгерту мүмкіндігі бар процестің математикалық моделі құрастырылды. Модельдеу кросс-жылу алмастырғыштарды енгізу, сутегі айналымын жабу және температуралық жағдайларды тұрақтандыру энергия шығынын 6-7 %-ға төмендетуге, сутегін пайдалану тиімділігін арттыруға және реформаттың сапасын тұрақтандыруға болатындығын көрсетті. Алынған нәтижелер энергия тиімділігін реформалаудың кеешенді тәсілін қолданудың орындылығын растайды және мұнай өңдеуді тұрақты дамыту саласындағы халықаралық тәжірибеге сәйкес келеді. Өзірленген тәсіл нақты уақыт режимінде процесс параметрлерін бақылау және оңтайландыру үшін цифрлық құралдарды құру үшін негіз ретінде пайдаланылуы мүмкін.

Кілтті сөздер: энергия тиімділігі, каталитикалық риформинг, жұмыс режимі, параметрлер, жылу ағыны

R. M. Dyussova¹, E. A. Zhakmanova², G. Zh. Seytenova³

¹Toraighyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar.;

²L. N. Gumilyov Eurasian National University, Republic of Kazakhstan, Astana.;

³Association of legal entities «Association of Producers and Consumers of Petrochemical Products (Petrochemical Association)», Republic of Kazakhstan, Astana.

Received 15.07.25

Received in revised form 23.07.25

Accepted for publication 05.09.25

OPTIMIZATION OF HEAT FLOWS AND MODES TO INCREASE THE ENERGY EFFICIENCY OF CATALYTIC REFORMING

In the context of rising energy costs and tightening environmental requirements, energy efficiency improvement issues are becoming key for catalytic reforming processes, which are the most important technology in the production of high-octane gasolines, aromatic hydrocarbons and feedstock for the petrochemical industry. This work is aimed at studying the possibilities of optimizing heat flows and equipment operation modes in order to reduce specific energy consumption without large-scale reconstruction of the units. Based on the data of the operating catalytic

reforming unit, a thermal and energy analysis was carried out, a heat balance was calculated, heat losses were determined, and the efficiency of hydrogen circulation was analyzed. A mathematical model of the process with the ability to vary key parameters (temperature, pressure, feedstock and H₂S consumption), and feedstock composition was built. The simulation showed that the introduction of cross-flow heat exchangers, closing the hydrogen cycle and stabilizing temperature conditions can reduce energy consumption by 6–7 %, increase the efficiency of hydrogen use and stabilize the quality of the reformat. The results confirm the feasibility of using an integrated approach to the energy efficiency of reforming and are consistent with international practice in the field of sustainable development of oil refining. The developed approach can be used as a basis for creating digital tools for monitoring and optimizing process parameters in real time.

Keywords: energy efficiency, catalytic reforming, operating mode, parameters, heat flow

МРНТИ 44.01.94:

<https://doi.org/10.48081/OCZA9347>

***У. Жалмагамбетова¹, М. Крыкбаева²,
А. Шимпф³, А. Казамбаев⁴, Д. Снопков⁵**

^{1,2,3,4,5}Торайғыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2261-2222>

²ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-0770-5164>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4203-9117>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-5081-1623>

⁵ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6907-9667>

*e-mail: ultuara@mail.ru

ЭФФЕКТИВНОЕ РЕШЕНИЕ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ ПО РАДИОКАНАЛУ ДЛЯ АВТОНОМНЫХ СТАНЦИЙ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

В статье рассмотрена возможность передачи данных по радиоканалу для автономных мобильных систем экологического мониторинга. В результате поиска и изучения информации о современных методах передачи данных с первичных измерителей на стационарных источниках эмиссий, проведен анализ информации об облачных технологиях и решениях, применимых для автоматизированного мониторинга, исследованы существующие протоколы передачи данных, их возможности и применимость в передвижных станциях мониторинга окружающей среды.

При исследовании требований безопасности передачи данных и возможных методов их защиты подготовлена структурная схема разработанной системы передачи информации. Такая система учитывает возможность интеграции облачных сервисов для сбора, хранения и обработки данных.

Приведенные результаты экспериментов были получены при передаче по радиоканалу с использованием микропроцессоров Raspberry Pi. Такое решение должно учитывать использование мобильных станций экологического мониторинга в удаленных труднодоступных местах, без возможности применения сотовой связи. К удалённым местам без покрытия GSM также можно отнести степь, рельеф или густую растительность, где невозможна установка необходимого

стационарного оборудования. Такие изолированные территории как правило подвергаются экологическому влиянию внешних антропогенных факторов, без возможности фиксации основных показателей от источников загрязнений.

Ключевые слова: Raspberry Pi, выбросы, Industry 4.0, IoT, микропроцессоры, системы автоматизированного мониторинга.

Введение

На сегодняшний день вопросы экологического мониторинга особенно остро встают не только для Павлодарской области, но и для всех промышленных регионов нашей страны. Это связано в первую очередь с высокими требованиями экологического законодательства [1]. Павлодарская область – это индустриальная развитая промышленная область в Казахстане, где сосредоточены крупные промышленные предприятия. Здесь расположены заводы, специализирующиеся на переработке различного сырья. Основные отрасли промышленности в Павлодарской области включают металлургию, химическую промышленность и машиностроение. Крупнейшие предприятия занимаются производством стали, труб, химических и других продуктов. Для примера в области находятся заводы по производству стали и металлопроката, что делает её важным центром металлургической промышленности в стране.

Кроме того, в регионе работают предприятия, занимающиеся переработкой сельскохозяйственной продукции и других видов сырья. Это способствует развитию экономики и обеспечивает население необходимыми товарами [2].

Такое отягощение промышленностью региона накладывает особые обязательства по охране окружающей среды и экологическому мониторингу. Особенно это касается мест, не имеющих фиксированных стационарных пунктов сбора информации по основным показателям загрязняющих выбросов. В Казахстане уже в течении десятилетия ведётся работа по внедрению систем экологического контроля за состоянием воздуха, почв и водных ресурсов, но тем не менее, вопросы охраны окружающей среды на данный момент стоят не менее остро [3].

Материалы и методы

Проводятся исследования по внедрению мобильных систем автоматизированной передачи данных от источников загрязнений не имеющих стационарных пунктов сбора информации по выбросам. Такая автономная мобильная установка больше подходит для перемещения в степях, лесах, и других труднодоступных местах, где возможно возникновение стихийных источников загрязнения окружающей среды. Главной особенностью такой мобильной установки является передача данных без поддержки GSM.

Мобильная установка даёт возможность применения не только в городе и местах, где присутствует сотовая связь, но и удалённых от мобильной связи точках. Автономные станции экологического мониторинга могут быть установлены на наземных и воздушных устройствах с дистанционным управлением (квадрокоптеры, радиоуправляемые машины) [4].

Использование микропроцессоров Raspberry Pi для передачи данных по радиоканалу в удалённых и труднодоступных местах, где отсутствует сотовая связь, представляет собой перспективное направление в области экологического мониторинга. Эти устройства обладают рядом преимуществ, которые делают их идеальными для решения подобных задач.

Во-первых, Raspberry Pi отличается компактностью и энергоэффективностью, что позволяет использовать их в автономных системах, работающих от аккумуляторов или солнечных панелей. Это особенно важно в условиях, где доступ к внешним источникам питания ограничен [5].

Во-вторых, Raspberry Pi обладает широким спектром возможностей для интеграции с различными датчиками и устройствами, что позволяет создавать многофункциональные системы мониторинга. Например, с их помощью можно собирать данные о качестве воздуха, воды, почвы, уровне шума, температуре и других экологических параметрах [6].

В-третьих, Raspberry Pi поддерживает различные протоколы связи, включая радиоканалы, что обеспечивает гибкость в выборе способа передачи данных. Это особенно важно для работы в условиях, где сотовая связь недоступна.

Однако использование Raspberry Pi в таких условиях также сопряжено с рядом вызовов. Одним из основных является необходимость обеспечения надёжной и устойчивой связи между устройствами. Радиоканалы могут быть подвержены помехам и затуханию сигнала, особенно в условиях сложного рельефа или густой растительности. Для решения этой проблемы можно использовать различные методы, такие как выбор оптимального частотного диапазона, применение усилителей сигнала и антенн с высоким коэффициентом усиления. Отметим, что необходимо учитывать вопросы безопасности данных при передаче их по радиоканалу [7]. В условиях удалённого мониторинга важно обеспечить защиту от несанкционированного доступа и перехвата информации. Это может быть достигнуто с помощью шифрования данных и использования надёжных протоколов аутентификации.

Также стоит отметить, что разработка и внедрение таких систем требует тщательного планирования и тестирования. Необходимо учитывать особенности конкретной местности, выбирать подходящие датчики и

оборудование, а также проводить регулярные проверки и калибровку системы.

Результаты и обсуждение

Спроектирована система телеметрии LoRa на базе Python для Raspberry Pi 4 и E22-900T22S (UART), которая поддерживает шифрование AES-128, контрольную сумму CRC8, ведение журнала в формате CSV и автоматический сбор данных. Структурная схема приведена на рисунке 1.

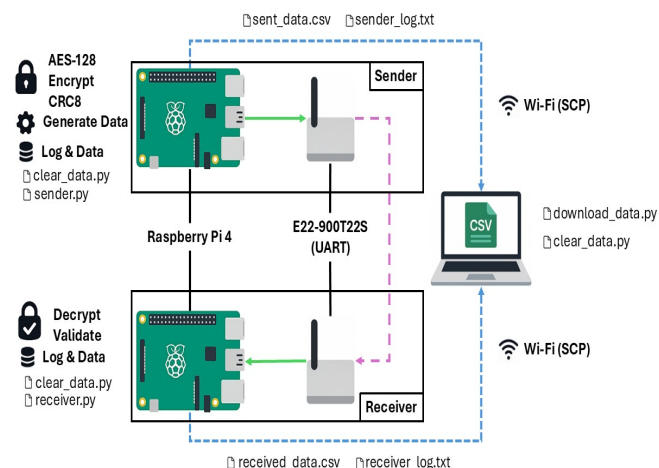


Рисунок 1 – структурная схема спроектированной системы передачи данных на базе Raspberry Pi 4

Для оценки эффективности технологии беспроводной передачи данных LoRa в условиях открытого пространства был проведён эксперимент с использованием контроллера Raspberry Pi и радиомодуля SX1272 (рисунок 2). Целью эксперимента являлась комплексная оценка стабильности связи, дальности уверенного приёма, а также изучение влияния расстояния на основные параметры радиосигнала, такие как RSSI (Received Signal Strength Indicator) и SNR (Signal-to-Noise Ratio). Эксперимент направлен на получение объективных количественных показателей, позволяющих сделать выводы о применимости технологии LoRa для задач передачи телеметрической информации в распределённых системах мониторинга.

В ходе эксперимента были использованы следующие технические и программные средства: контроллер Raspberry Pi 4 Model B с 4 ГБ оперативной памяти, LoRa-модуль Semtech SX1272, работающий в диапазоне частот

868 МГц, всенаправленная антенна с коэффициентом усиления 5 dBi, операционная система Raspbian OS, библиотека LoRa-коммуникаций

RadioHead (RH_RF95), измерительное программное обеспечение и пользовательские Python-скрипты для логирования параметров.

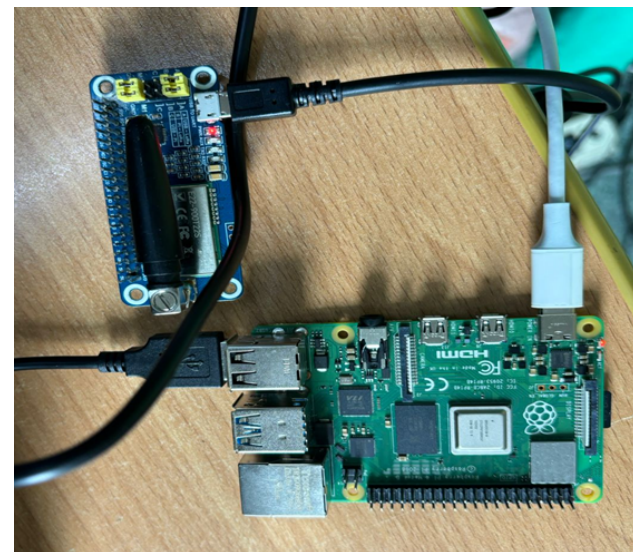


Рисунок 2 – Устройства для передачи данных на базе Raspberry Pi, проведение эксперимента

Результаты тестирования с использованием AES-128 приведены в табличной форме на рисунке 3. AES-128 (от англ. Advanced Encryption Standard) – это алгоритм блочного шифрования, основанный на нескольких подстановках и перестановках, происходящих с блоками данных по 16 байт. Длина ключа этого вида шифрования равна 128 бит, с 3 уровнями защиты.

Эксперимент проводился в городе, в дневное время с учетом возможных помех от внешних устройств, с фиксацией параметров при изменении дистанции, начиная от 100 метров до одного километра. Можно отметить, что в городском режиме показатели обычно хуже, так как на открытой местности, удаленной от источников шума сигнал проходит значительно лучше [8]. На рисунке 3 приведены результаты передачи пакетов данных на минимально расстоянии, это 100 и 200 метров, как видно пакет доставлен полностью, без потерь и помех. При увеличении расстояния более 1 километра, доставка пакетов снижается почти до 80 %. Что позволяет сделать вывод, что данное устройство в приведенной комплектации имеет смысл использовать на

расстоянии не более 800 метров. Для увеличения дальности вещания возможно использовать антенну большей мощности [9].

packet_id,timestamp,temperature,pressure,humidity,density,concentration,crc_ok,,,,,,,,,,,,,	
1747883258,5/22/2025 4:07,21,980,60,1,72,True,Внутри помещения,"В результате проведённой работы был разработан и апробирован прото	
Программное обеспечение, установленное на Raspberry Pi, представляет собой систему на базе ОС Raspbian с установленными Python-скрипта	
Эксперим	
1747883288,5/22/2025 4:08,22,991,41,2,144,True,,,,,,,,,,,,,	
1747883318,5/22/2025 4:08,30,1005,55,3,108,True,,,,,,,,,,,,,	
1747883348,5/22/2025 4:27,24,900,60,1,90,True,"100m,,,,,,,,,,,,,	
1747883378,5/22/2025 4:28,26,965,54,2,139,True,,,,,,,,,,,,,	
1747883408,5/22/2025 4:28,32,999,45,2,56,True,,,,,,,,,,,,,	
1747883438,5/22/2025 4:57,25,986,60,1,50,True,"200m,,,,,,,,,,,,,	
1747883468,5/22/2025 4:58,28,987,41,1,120,True,,,,,,,,,,,,,	
1747883498,5/22/2025 4:58,31,1003,55,2,57,True,,,,,,,,,,,,,	
,,,,,,,,,,,,,	
№,Пакет, (м),RSSI (дБм),SNR (дБ),Пакеты,Успешно,Потери,"RSSI (в помещении), dBm","SNR (в помещении), dB","Потеря пакетов, %"	
1,25,-35,10,5,50,50,0%,55,7,0,,,,,,,,,,,,,	
2,50,-40,10,50,50,0%,67,5,5,,,,,,,,,,,,,	
3,75,-45,9,5,50,50,0%,75,3,8,,,,,,,,,,,,,	
4,100,-50,9,50,50,0%,82,1,15,,,,,,,,,,,,,	
5,125,-58,8,50,49,2%,,,,,,,,,,,,,,	
6,150,-65,6,5,50,48,4%,,,,,,,,,,,,,,	
7,175,-72,5,50,47,6%,,,,,,,,,,,,,,	
8,200,-78,3,5,50,45,10%,,,,,,,,,,,,,,	
,,,,,,,,,,,,,	
Формирование (мс),Обработка (мс),,,,,,,,,,,,,,	
120,80,,,,,,,,,,,,,	

Рисунок 3 – отображение результатов экспериментов

Информация о финансировании Исследования выполнены при поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан в рамках проекта программно-целевого финансирования ИРН BR2182258 «Разработка комплекса интеллектуальных информационно-коммуникационных систем для экологического мониторинга эмиссий в окружающую среду для принятия управленческих решений в концепте углеродной нейтральности».

Выводы

Применение микропроцессоров Raspberry Pi для экологического мониторинга в удалённых и труднодоступных местах представляет собой перспективное и многообещающее направление. Однако для успешного применения таких систем необходимо учитывать ряд факторов, связанных с надёжностью связи, безопасностью данных и особенностями местности. Несмотря на небольшое увеличение времени обработки сообщений и общего объёма передаваемых данных, защищённый режим позволил обеспечить базовый уровень криптографической стойкости, достаточный для защиты телеметрической информации от пассивного перехвата и несанкционированного доступа. При изменении конфигурации системы и использованного технического оборудования возможно улучшение отдельных показателей системы, таких как дальность передачи данных,

переход к спящему режиму, количество переданных пакетов и т.д. Такие показатели необходимо задать при проектировании системы передачи данных для автоматизированного экологического мониторинга [10].

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Zhong, J. Y., Zheng, G. Q., Lei, J. Che Chen, Analysis of the current state and trends of air quality monitoring networks. Monit. China. 2007. Vol.p. 02, P.113–118.
- 2 Карделино, К. А., Чамейдес, В. Л., Применение данных со станций мониторинга фотохимической оценки к модели, основанной на наблюдениях // Атмос. Окружающая среда. 2000. Вып.34. С. 2325.
- 3 Baskakov, S. S. Distributed Monitoring Systems Based on Wireless Sensor Networks. «Hardware and Software of Control, Control and Measurement Systems». 2012. М.
- 4 Жалмагамбетова, У., Нефтисов А., Environmental monitoring in kazakhstan context – state-of-the-art and challenges for industrial region // Вестник Торайгыров университета. Энергетическая серия. – 2024. – № 1. – С. 82-93. <https://doi.org/10.48081/MOFF1407>
- 5 Жалмагамбетова, У., Проектирование систем передачи информации для автоматизированного экологического мониторинга // Вестник Торайгыров университета». Энергетическая серия. – 2025. – №1. С.108-120. <https://doi.org/10.48081/WNUU3720>
- 6 Кириченко, Л., Методы определения эмиссий от основных стационарных источников загрязнений // Вестник Торайгыров университета. Энергетическая серия. – 2024. – № 3. – С. 167-180. <https://doi.org/10.48081/HRWJ4394>
- 7 Zhalmagambetova, U., Development of an automatic monitoring system based on the open architecture concept // Вестник Торайгыров университета. Энергетическая серия. – 2024. – № 2 – С. 112–125. <https://doi.org/10.48081/BMOM3785>
- 8 Рябовая, В. О., Доронина, Ю. В. Повышение эффективности систем экологического мониторинга // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2012. Вып. 4. №6 (58). С. 41–44.
- 9 Imboden, D., Pfenninger, S. Introduction to Systems Analysis: Mathematically Modeling Natural Systems // Berlin, New York, Springer. 2013. Vol. 8. P. 235–252.
- 10 Comella-Dorda, S., Wallnau, K., Seacord R.C., Robert J. A Survey of Legacy System Modernization Approaches // Carnegie Mellon University. Tech.

Note CMU/SEI-2000-TN-003. 2000. URL:<http://www.sei.cmu.edu/publications/documents/00.reports/00tn003.html>

REFERENCES

1 **Zhong, J. Y., Zheng, G.Q., Lei, J.,** Che Chen, Analysis of the current state and trends of air quality monitoring networks. Monit. China. 2007. Vol.02, P.113–118.

2 **Cardelino, K. A., Chameides, V. L.** Primenenie dannyh so stancij monitoringa fotohimicheskoy ocenki k modeli, osnovannoj na nablyudeniyah [Application of data from photochemical assessment monitoring stations to an observation-based model] // Atmos. Environment. 2000. Vol.34. p. 2325.

3 **Baskakov, S. S.** Distributed Monitoring Systems Based on Wireless Sensor Networks. «Hardware and Software of Control, Control and Measurement Systems». 2012. M.

4 **Zhalmagambetova, U, Neftisov A.,** Environmental monitoring in kazakhstani context – state-of-the-art and challenges for industrial region // Vestnik Toraygyrov university. Energy seriy – 2024. – № 1. – P. 82–93. <https://doi.org/10.48081/MOFF1407>

5 **Zhalmagambetova, U,** Proyektirovaniye sistem peredachi informatsii dlya avtomatizirovannogo ekologicheskogo monitoring [Design of information transmission systems for automated environmental monitoring] //Vestnik Toraygyrov universiteta». Energeticheskaya seriya – 2025. – № 1. P. 108–120. <https://doi.org/10.48081/WNUU3720>

6 **Kirichenko, L.,** Metody opredeleniya emissiy ot osnovnykh statsionarnykh istochnikov zagryazneniy [Methods for determining emissions from the main stationary sources of pollution] // Bulletin of Toraigyrov University. Energy series. – 2024. – № 3. – P. 167–180. <https://doi.org/10.48081/HRWJ4394>

7 **Zhalmagambetova, U.,** Development of an automatic monitoring system based on the open architecture concept // Bulletin of Toraigyrov University. Energy series. – 2024. – № 2 – P. 112–125. <https://doi.org/10.48081/BMOM3785>

8 **Ryabovaya, V. O., Doronina, Yu. V.** Povyshenie effektivnosti sistem ekologicheskogo monitoringa [Improving the effectiveness of environmental monitoring systems]. 2012. Vol.. 4. № 6 (58). P. 41\201244.

9 **Imboden, D., Pfenninger, S.** Introduction to System Analysis: Mathematical Modeling of Natural Systems. 2013. Vol. 8. P. 235\2012252.

10 **Comella-Dorda, S., Wallnau, K. Sicord, R.K., Robert J.** Review of Approaches to Modernizing Obsolete Systems // Carnegie Mellon University. Technical note CMU/SEI-2000-TN-003. 2000. URL: <http://www.sei.cmu.edu/publications/documents/00.report/s/00tn003.html>

Поступило в редакцию 23.07.25

Поступило с исправлениями 29.07.25

Принято в печать 05.09.25

*У. Жалмагамбетова¹, М. Қрыкбаева², А. Шимф³,

А. Казамбаев⁴, Д.Снопков⁵

^{1,2,3,4,5}Торайғыров университет, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.

23.07.25 ж. баспаға түсті.

29.07.25 ж. түзетулерімен түсті.

05.09.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

АВТОНОМДЫ ҚОРШАҒАН ОРТАНЫ БАҚЫЛАУ СТАНЦИЯЛАРЫ ҮШІН РАДИОАРНА АРҚЫЛЫ ДЕРЕКТЕРДІ БЕРУДІҢ ТИІМДІ ШЕШІМІ

Мақалада мәліметтерді радиоарна арқылы беру арқылы қоршаған ортаны бақылаудың автономды мобильді жүйелерін пайдалану қарастырылады. Стационарлық эмиссия көздеріндегі бастапқы өлшеу құрылғыларынан деректерді берудің заманауи әдістері туралы ақпаратты іздеу және зерделеу нәтижесінде бұлттық технологиялар және эмиссиялардың автоматтандырылған мониторингі үшін қолданылатын шешімдер туралы ақпаратқа талдау жүргізілді, деректерді берудің қолданыстағы хаттамалары, олардың мүмкіндіктері мен автономды экологиялық мониторинг станцияларында қолдану мүмкіндігі зерттелді.

Деректерді беру қауіпсіздігі талаптарын және оларды қорғаудың мүмкін әдістерін зерделеу кезінде әзірленген ақпаратты беру жүйесінің құрылымдық диаграммасы дайындалды. Мұндай деректерді беру жүйесі деректерді жинау, сақтау және өңдеу үшін бұлттық қызметтерді біріктіру мүмкіндігін ескереді. Ұсынылған эксперименттік нәтижелер Raspberry Pi микропроцессорларының көмегімен радиоарна арқылы деректерді беру кезінде алынды. Мұндай шешім ұялы байланысты пайдалану мүмкіндігінсіз шалғай, жету қиын жерлерде жылжымалы қоршаған ортаны бақылау станцияларын пайдалануды ескеруі керек. GSM қамтуы жоқ шалғай жерлерге сонымен қатар қажетті стационарлық жабдықты орнату мүмкін болмайтын дала, жер немесе тығыз өсімдіктер жатады. Мұндай оқшауланған аумақтар әдетте ластану көздерінен негізгі көрсеткіштерді тіркеу мүмкіндігінсіз сыртқы антропогендік факторлардың экологиялық әсеріне ұшырайды.

Kilmmi sözder: Raspberry Pi, шығарындылар, Industry 4.0, IoT, микропроцессорлар, автоматтандырылған бақылау жүйелері.

*U. Zhalmagambetova¹, M. Krykbayeva², A. Shimpf³,
A. Kazambayev⁴, D. Snopkov⁵,
^{1,2,3,4,5}Toraighyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar
Received 23.07.25
Received in revised form 29.07.25
Accepted for publication 05.09.25

AN EFFICIENT SOLUTION FOR DATA TRANSMISSION VIA RADIO CHANNEL FOR AUTONOMOUS ENVIRONMENTAL MONITORING STATIONS

The article discussed the use of autonomous mobile ecological monitoring systems with data transmission via radio channel. As a result of studying and analyzing on modern methods of data transmission with primary measurer at stationary emission sources an analysis of information on cloud technology and solution applicable for autonomous emission was conducted, existing data transmission protocols, their capacities and applicableness on autonomous environmental monitoring station were studied.

Structured scheme of developed information transmission system was prepared during the research of the data transfer security ad possible methods of their protection. This data transmission system includes the possibility of integrating cloud services for collecting, storing and processing data.

The given experiment results were received during transferring the data via radio channel with the use of Raspberry Pi microprocessors. This solution must include the use of mobile ecological monitoring stations in remote, hard to reach places without the possibility of using cellular communications. Remote areas without GSM coverage also include steppe, terrain or dense vegetation where it is impossible to install the necessary stationary equipment. Previously listed isolated territories, generally, are subject to environmental influences from external anthropogenic factors without the ability to fix main pollution source indicators.

Key words: Raspberry Pi, Emissions, Industry 4.0, IoT, microprocessors, autonomous monitoring systems

SRSTI 44.29.29

<https://doi.org/10.48081/GPVK4034>

***V. A. Ivanov¹, Ye. S. Kotov², L. I. Daich³,
D. V. Lissitsyn⁴, Ye. B. Potyomkina⁵**

^{1,2,3,4,5}Abylkas Saginov Karaganda Technical University,
Republic of Kazakhstan, Karaganda.

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2811-7908>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2660-2010>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9524-5857>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8800-9661>

⁵ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1124-7995>

*e-mail: v.ivanov@ktu.edu.kz

ANALYSIS OF SWITCHING MODES TRANSIENT PROCESSES IN HIGH-VOLTAGE ELECTRICAL NETWORKS

The article is devoted to the analysis of transient processes in high-voltage electric networks under various switching modes. The parameters of this process are individual for each object and, moreover, even for each specific switching. Transient processes in switching modes create electromagnetic fields that cause interference and overvoltage in the secondary network and even in the internal circuits of the power supply system. This can lead to failures in operation and damage to electrical equipment. To assess the impact of switching processes on the operation of electrical equipment, a single-line diagram is considered and the characteristics of the electrical equipment included in the power supply system of the «Yuzhnaya» substation of «Shubarkol Komir» JSC are given. The switching processes that occur when turning on/off the feeder, turning on the load, emergency load shedding, as well as emergency disconnection of the feeder under load are considered. The parameters of the processes under consideration are calculated based on the switching processes. To analyze the characteristics of these transient processes, a mathematical model of the power supply system is developed and its modeling is carried out. Time diagrams of voltage on the feeder are given. Based on the data obtained, switching modes in electrical networks were determined that had

the most negative impact on the operation of electrical equipment, both as a whole and on its various parts.

Keywords: Power supply system, electrical networks, switching modes, transient processes, high-frequency overvoltages, mathematical model.

Introduction

Switching interference is caused by changing the load. In electrical networks, distribution devices and electrical equipment chains the causes of electromagnetic effects that have a detrimental effect on automatic and automated systems for technological control of electrical facilities are [1]:

- transients in high-voltage circuits, which occur when switching of circuit breakers and disconnectors, short circuits, and when overcurrent limiters are activated;
- electrical and magnetic fields of industrial frequency generated by power equipment of stations and substations;
- transient processes in substation grounding devices caused by industrial short-circuit currents and lightning currents;
- fast transition processes in low voltage inductive circuits; transition processes in chains of different classes of voltage when lightning strikes directly into or near the object;
- static electricity discharge;
- electromagnetic disturbances in the operational current circuits.

Investigation of switching interference is possible by experimental way, as well as by mathematical or simulation modelling methods.

Materials and methods

To simulate the operation of transition processes occurring in the substation «Yuzhnaya» JSC «Shubarkol Komir», figure 1 presents a single-line power supply scheme of the substation.

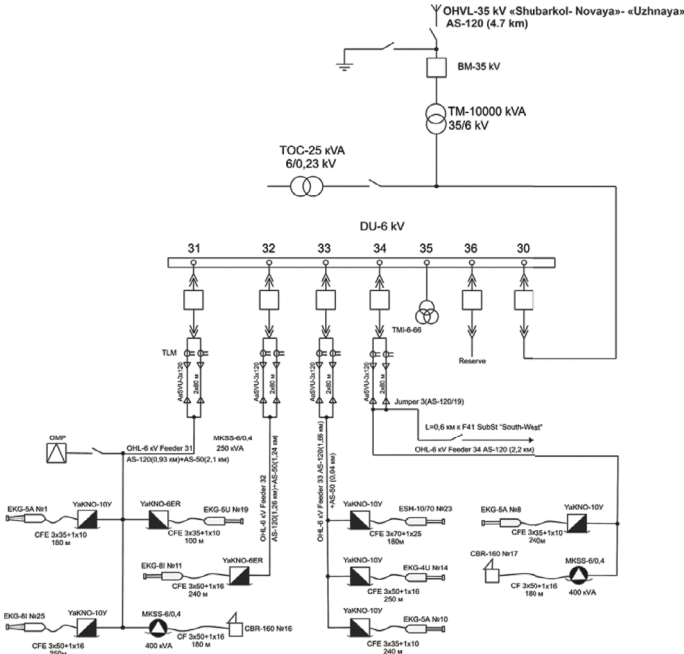


Figure 1 – Single line substation power supply circuit.

The «Yuzhnaya» substation has one incoming feeder and 5 waste feeders, one of which is in reserve. The remaining 4 provide electricity to various electrical equipment along the power lines. The 35 kV voltage is supplied to the substation via a high-voltage overhead power line. The voltage conversion from 35 kV to 6 kV is produced by a transformer of the TM-10000 kVA 35/6.

The application programming package MATLAB SIMULINK is used to create a simulation model of substation’s electricity supply [2].

The method was used to calculate the parameters of the TM-10000 kVA 35/6 transformer [3]. Based on reference data, calculated using the mathematical software MathCad [4]. The calculation results are shown in table 1.

Table 1 – Calculation data of the transformer TM-10000 kVA 35/6

Transformer parameter	Estimated for TM-10000 kVA 35/6
Active resistance of windings. Ohm	0.398/0.012
Full resistance to wrapping. Ohm	4.594
Inductive winding resistance. Ohm	4.576

Inductance of windings. Road	0.015
Full power loss in transformer idle mode. kVA	80
1No-magnetizing transformer power. kVar	78,670
Active resistance of the magnetization circuit. Ohm	84480
Inductive resistance of the magnetization circuit. Ohm	15570
Inductance of the magnetization circuit. Hn	49.565

For the construction of model cable lines and overhead power lines used ready-made units [2]. Active resistance and specific inductive resistance, taken from reference data [3; 4; 5].

Inductance values of cable and overhead power lines are found from the expression:

$$L_0 = \frac{x_0}{2\pi f}, \text{ Hn} \quad (1)$$

where: x_0 -the specific inductive resistance, Ohm;

f – power frequency, Hz.

The capacity of the overhead power line is defined by the expression:

$$C_0 = \frac{b_0}{2\pi f} \cdot F \quad (2)$$

where b_0 - specific capacitive conductance, Sm/km.

The capacity of cable lines is selected according to the voltage and cross-sectional area of the conductor. The capacitance conductivity of overhead cable lines is in the range (2,6 ... 2,8) 10-6 cm/km [6]. The capacity of overhead cable lines is therefore $8.28 \cdot 10^{-9}$ F/km [6]. Parameters required for the cable line model are presented in table 2.

Table 2 – Cable Characteristics

Line Options	AaSVU-3x120	AS-120	AS-50	CFE 3x35	CAE 3x50	CO 3 x70
Resistance of the direct and zero sequence line, Ohm/km	0,258	0.2440	0.5951	0,54	0.39	0,28
The inductance of the direct and zero sequence line, Hn/km	$0,191 \cdot 10^{-3}$	$1,162 \cdot 10^{-3}$	$1,216 \cdot 10^{-3}$	$0,277 \cdot 10^{-3}$	$0,264 \cdot 10^{-3}$	$0,255 \cdot 10^{-3}$

Direct and zero line sequence capacity, F/km	$8,28 \cdot 10^{-9}$	$8,28 \cdot 10^{-9}$	$8,28 \cdot 10^{-9}$	0,31	0,36	0,40
--	----------------------	----------------------	----------------------	------	------	------

The availability of different electrical equipment connected to the substation allows modelling with different load parameters. As the electric excavator motors are connected directly to the high voltage, the corresponding electric motors are used as loads.

The reference data is used for calculation of parameters of electric motor replacement scheme [7; 8; 9]. The input data for building the modelled electric motors are presented in table 3.

Table 3 – Input data for the construction of electric motor models

Electrical equipment name	ECG-5A	ECT-8I	ECG-4U	ESH-10/70
Motor type	AE-4001-4U2	SDEO-14-29-6	AE113-4M	SDE2-16- 46-6U2
Rated power, kWt	250	560	250	1250
Nominal linear voltage. V	6000	6000	6000	6000
Magnetic field rotation speed, rpm	1500	1000	1480	1000
Efficiency factor, %	94.5	93.8	92	96
Rated power factor	0.89	0,9	0.905	0,9
Maximum moment fraction	2,7	2	2,7	2.1
Trigger moment multiplicity	1.2	0.7	1.2	0.8
Starting current ratio	6.5	6.5	6.5	6.2
Moment of inertia, kg·m ²	400	P0	400	370
Active resistance of the seed layers of the stator winding, Ohm	3,014	1,631	1,754	0,184

Simulation of the switching interference modelling under different operating modes of electrical equipment. For investigation of switching interference arising from high-voltage circuit breakers, a substation simulation model (figure 2) was developed using MatLab Simulink software based on the single-line supply scheme shown above (figure 1).

For easy viewing of the model as a whole, we have developed the following model blocks:

- substation unit (35/6) containing the vacuum circuit breakers of the substation;
- unit of high-voltage lines (Line), containing in itself overhead power lines, with parameters selected according to reference data;
- electrical equipment unit (ECG, ECT, ESH (Table 3)) containing models of electric motors excavators serving as a main load.

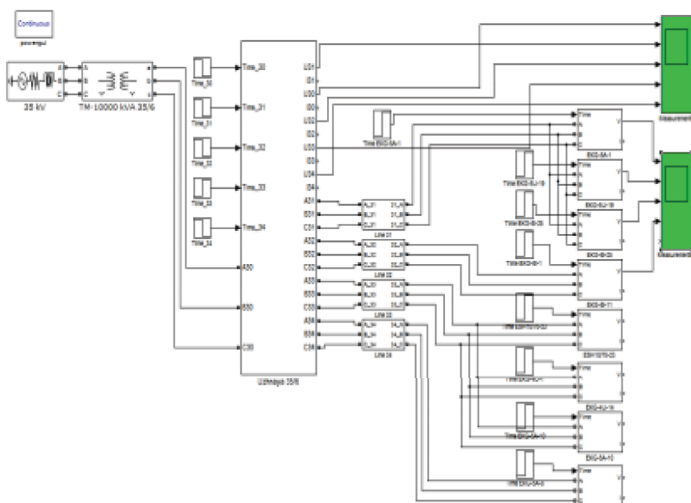


Figure 2 – Substation Simulation Model

The voltage to the feed transformer is supplied by a three-phase AC voltage source. Next, the substation unit whose switches are controlled by single step effects (Time), which are started at a certain time. The voltage is transmitted on power lines (Line), to the corresponding YaKNO (cell of the quarry outdoor installation). The control of the cell switches is also done with the help of single step effects (Time). The voltage is then applied to electrical equipment (EKG, ESH) whose main power consumers are asynchronous or synchronous motors [10; 11].

Results and Discussion

To evaluate the impact of switching processes on electrical equipment, consider the following modes: switching processes occurring when the feeder is turned on/ off, load switching (including simultaneous switching of different

loads connected to one feeder), the accidental load-off and the accidental off of the loaded feeder. The switching of electric motors is considered as a load.

Figure 3 shows a stress oscillation showing the mutual effect of the feeders on each other when load is switched on.

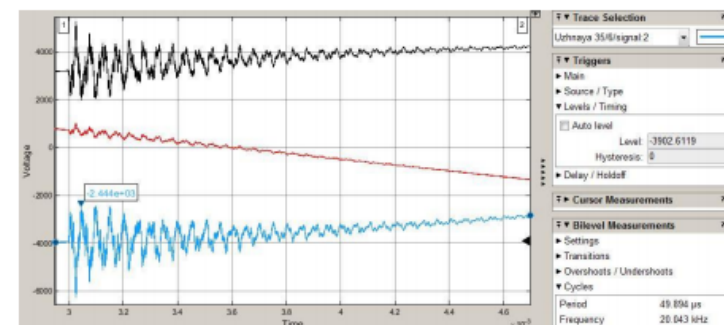


Figure 3 – Transition Process Occurring On The Feeder When Another Feeder Is Switched On Within A Substation

As shown by the presented oscillation and calculations, the change in signal amplitude at the feeder of the substation is about 1458 V and is represented as fading vibrations with a frequency of about 20 kHz. However, when zoomed in you can see the high frequency component (figure 4). The signal frequency on the feeder under load when another feeder is switched on is 595 kHz.

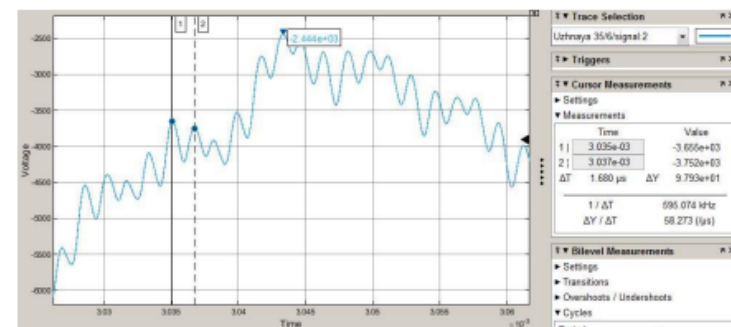


Figure 4 – Form of the signal for overvoltage

Figure 5 shows the oscillation of the load on the feeder when the load is connected.

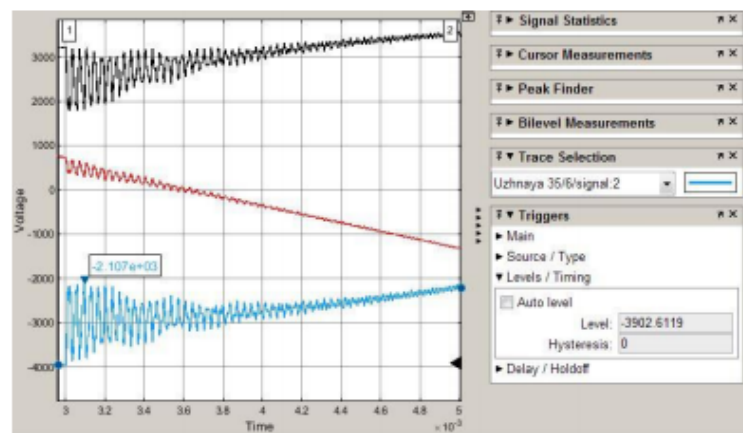


Figure 5 – Transition process occurring on the feeder at load connection

The presented oscillation shows a change in signal amplitude at the feeder of the substation, which is about 1795 V and is represented as fading oscillations with a frequency of about 20 kHz.

Figure 6 shows a stress oscillation showing the effect of the switching process on the feeder while simultaneously including different loads.

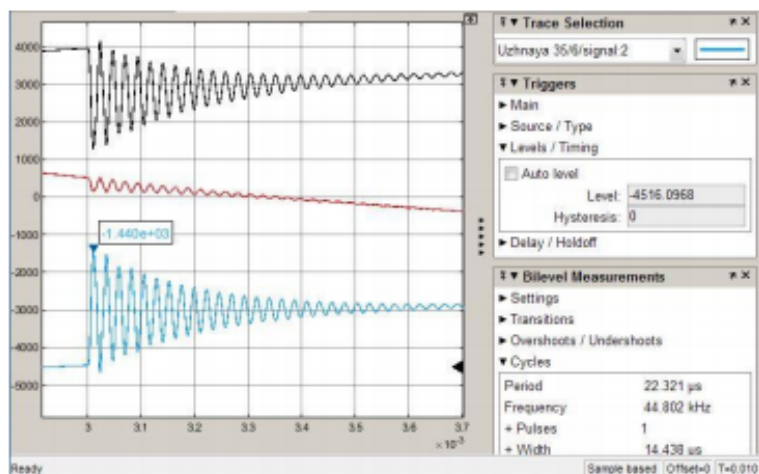


Figure 6 – Transition process occurring on the feeder when switching on different loads

As shown by the presented oscillation, the change of voltage on the feeder of the substation is the fading of initial amplitude oscillations around 3000 V with a frequency around 45 kHz.

Figure 7 shows the oscillation of voltages, in case of an emergency disconnection of one of the feeders of the substation under load.

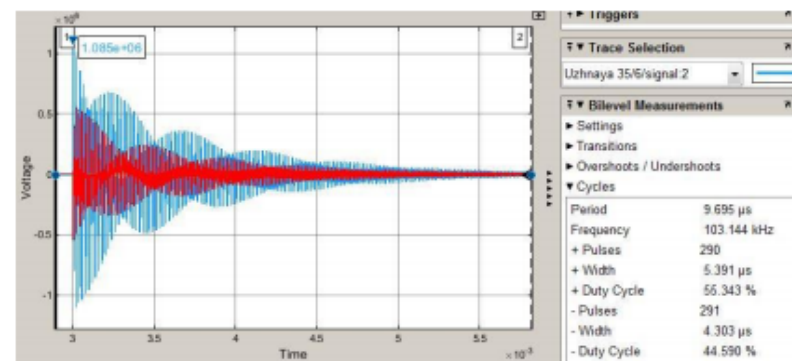


Figure 7 – Transition process occurring on the feeder at time of emergency shutdown

When the load is switched off, as in previous experiments, a switching overvoltage due to inductive currents occurs. Overvoltage is manifested as fading oscillations with a frequency of about 20 kHz. Based on the first law of switching current in the circuit can not be changed in a leapfrog, that is, the current before switching is equal to the current after switching [12; 13]. Also, according to the law of electromagnetic induction, the proportion of the network voltage that balances electromotive force self-induction is determined by the expression [14; 15]:

$$U = L \frac{di}{dt}, \quad (3)$$

where L – Inductance of the circuit, Hn;
di/dt – Current change rate.

It follows that even with small currents, dangerous overvoltages can occur due to very short transition time or current change rate (figure 8).

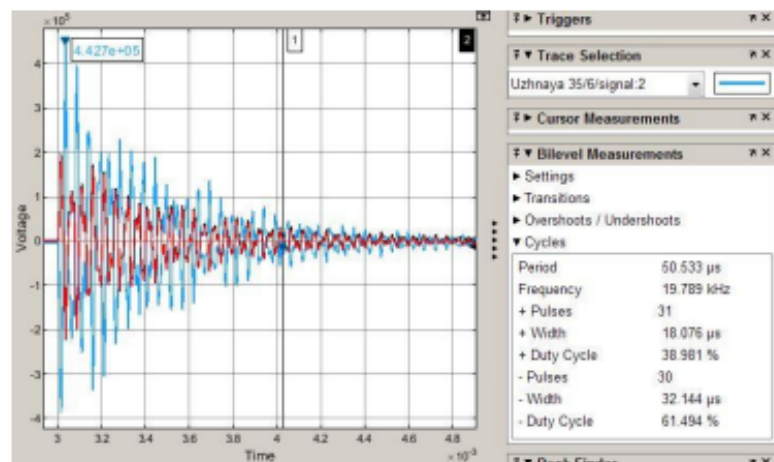


Figure 8 – Transition process occurring on the feeder at the moment of load disconnection

As shown in Figure 8, at the beginning of the transition process, voltage amplitude on one of the phases reaches a value of 442.7 kV, with a transition time of about 2 milliseconds. You can also see that different phases show different voltage amplitude. There is no phase shift on two phases due to load asymmetry and different time of switching off individual phases (this property is inherent in vacuum circuit breakers).

The main results of the modelling are presented in table 4.

Table 4 – Effect of switching processes on the state of the feeder

Mode of operation	Voltage amplitude, kV	Frequency, kHz
Feeder Switching On	1,458	595
Load Switching On	1,795	20
Two Types of Load Switching On	3,000	45
Feeder Emergency Shutdown	1,000	1200
Load Emergency Shutdown	442,7	20

Based on the data of table 4, a histogram of the influence of different switching modes on the state of the feeder is constructed, shown in figure 9. By the histogram it can be seen that the most negative effect is caused by the accidental disconnection of both the feeder and the load.

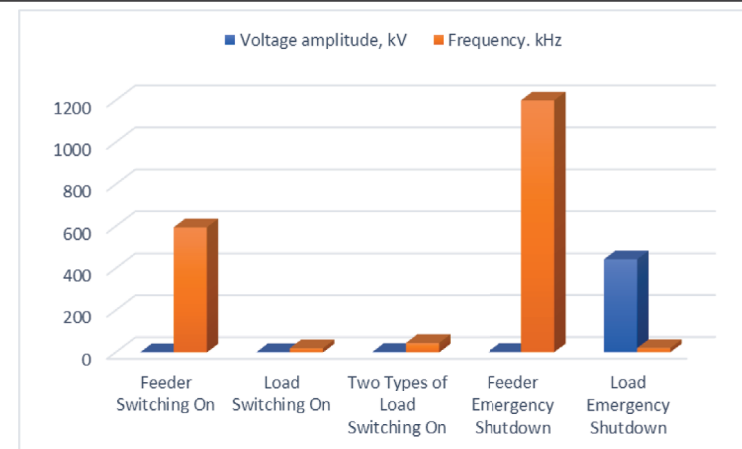


Figure 9 – Diagram of the effect of switching modes on the feeder

Conclusions

Based on the obtained data, the greatest influence on the processes occurring in electrical equipment is emergency shutdowns. Switching overvoltages, resulting from the occurrence of a transient process in the electrical network, have a detrimental effect on the operation of electrical equipment, both as a whole and on its various parts.

REFERENCES

- 1 **Harlov, N. N.** Electromagnetic compatibility in electricity: a training manual. [Text] – Tomsk: Publ. TPU, 2007. – 207 p.
- 2 **Djaconov, V. P.** MATLAB: complete self-teacher. [Text] – M. : DMK P. 2012. – 768 p.
- 3 Full guide to cable products. [Electronic resource]. – <https://k-ps.ru.28.04.2024>.
- 4 Catalogue of the cable factory «Energopom». [Electronic resource]. – <https://energoprom.net.ua.29.04.2024>.
- 5 Electrical information collection. [Electronic resource]. – <https://www.websor.ru.27.04.2024>.
- 6 **Gerasimenko, A. A., Fedin, V. T.** Transmission and distribution of electric energy: a teaching manual. – Edition 2. [Text] – Rostov-to-Don: Phoenix, 2008. – 715 p.
- 7 Catalogue of electrical equipment. [Electronic resource]. – <https://electro.mashinform.ru.27.02.2024>.

8 Ruselprom-SEA Equipment Catalog. [Electronic resource]. – <https://safemz.nt-rt.ru>. 28.02.2024.

9 Electric motor A4-400L (drive). Technical specifications. [Electronic resource]. – <https://www.lgc.ru>. 28.02.2024.

10 Vyatkin, V. Y., Kotov, E. S. Simulation of transition processes using a high-voltage coal cutting substation. [Text] – Almaty: Bulletin of KazNITU - 2020 – 4(140). – P. 122–127.

11 Marković, V. L., Gocić, S. R., Stamenković, S. N., Petrović, Z. L. Study of Transient Processes by Measurements of Dynamic Breakdown Voltages. In: Christophorou, L.G., Olthoff, J.K., Vassiliou, P. (eds) Gaseous Dielectrics X. [Text] – Springer, Boston, MA. 2004. P. 99-104.

12 Milenina, S. A. Electrical engineering: tutorial and workshop for SBO/ under the red. N. K. Milenina. Ed. 2 e. per. and. op. [Text] – Moscow: Publishing House Uretz, 2019. – 263 p.

13 Hima Bindu, V., Madhuri, V. V.S., Chandrashekar. D. Basic electrical engineering, [Text]. Gokaraju Rangaraju Institute of Engineering And Technology, 103 p.

14 Meatshev, V. M., Zhevaev, M. S. Transition processes in linear electrical circuits (in examples). – Ed. 2nd [Text] – Moscow: INFRA-M, 2018. – 347 p.

15 Transients in electrical circuits/Lectures. [Electronic resource]. – <https://intellect.bond/transients-in-electrical-circuits-811>. 27.03.2025

Received 15.04.25

Received in revised form 01.08.25

Accepted for publication 05.09.25

*В. А. Иванов¹, Е. С. Котов², Л. И. Дайч³, Д. В. Лисицын⁴, Е. Б. Потемкина⁵

^{1,2,3,4,5}Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті,

Қазақстан Республикасы, Қарағанды қ.

15.04.25 ж. баспаға түсті.

01.08.25 ж. түзетулерімен түсті.

05.09.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

ЖОҒАРЫ ВОЛЬТІ ЭЛЕКТР ЖЕЛІЛЕРІНДЕГІ АУЫСУ ПРОЦЕСТЕРІН ТАЛДАУ

Аңдатпа: Мақала әртүрлі коммутация режимдеріндегі жоғары вольтты электр желілеріндегі өтпелі процестерді талдауға арналған. Бұл процестің параметрлері әрбір объект үшін жеке болып табылады және оның үстіне, тіпті әрбір нақты коммутация үшін. Коммутация

режимдеріндегі өтпелі процестер қайталама желіде және тіпті электрмен жабдықтау жүйесінің ішкі тізбектерінде кедергілер мен асқын кернеу тудыратын электромагниттік өрістерді жасайды. Бұл электр жабдығының бұзылуына және зақымдалуына әкелуі мүмкін. Коммутация процестерінің электр жабдығының жұмысына әсерін бағалау үшін бір сызықты диаграмма қарастырылып, «Шұбарқол Көмір» АҚ «Южная» қосалқы станциясының электрмен жабдықтау жүйесіне кіретін электр жабдықтарының сипаттамалары келтірілген. Фидерді қосу/өшіру, жүкті қосу, жүктемені авариялық ажырату және жүктеме кезінде фидерді авариялық ажырату кезінде болатын коммутация процестері қарастырылады. Қарастырылып отырған процестердің параметрлерін есептеу коммутация процестері негізінде жүргізілді. Көрсетілген өтпелі процестердің сипаттамаларын талдау үшін электрмен жабдықтау жүйесінің математикалық моделі жасалып, оны модельдеу жүргізілді. Фидердегі кернеудің уақытша диаграммалары келтірілген. Алынған мәліметтер негізінде электр жабдығының жұмысына тұтастай алғанда да, оның әртүрлі бөліктерінде де ең жағымсыз әсер ететін электр желілеріндегі коммутация режимдері анықталды.

Кілтті сөздер: электрмен жабдықтау жүйесі, электр желілері, коммутация режимдері, өтпелі процестер, жоғары жиілікті асқын кернеулер, математикалық модель..

*В. А. Иванов¹, Е. С. Котов², Л. И. Дайч³, Д. В. Лисицын⁴,

Е. Б. Потемкина⁵.

^{1,2,3,4,5}Қарагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова,

Республика Қазақстан, г. Караганда.

Поступило в редакцию 15.04.25

Поступило с исправлениями 01.08.25

Принято в печать 05.09.25

АНАЛИЗ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ РЕЖИМОВ КОММУТАЦИИ В ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

Статья посвящена анализу переходных процессов в электрических сетях высокого напряжения, при различных коммутационных режимах. Параметры этого процесса индивидуальны для каждого объекта и, более того, даже для каждой конкретной коммутации. Переходные процессы в коммутационных режимах создают электромагнитные

поля, вызывающие наводки и перенапряжения во вторичной сети и даже во внутренних цепях системы электроснабжения. Это может привести к отказам в работе и повреждению электрооборудования. Для оценки влияния коммутационных процессов на работу электрооборудования рассмотрена однолинейная схема и приведены характеристики электрооборудования, входящего в систему электроснабжения подстанции «Южная» АО «Шубарколь комир». Рассмотрены коммутационные процессы, возникающие при включении/отключении фидера, включении нагрузки, аварийное отключение нагрузки, а также аварийное отключение фидера, находящегося под нагрузкой. Расчет параметров рассматриваемых процессов осуществлен на основании процессов коммутации. Для анализа характеристик указанных переходных процессов разработана математическая модель системы электроснабжения и проведено ее моделирование. Приведены временные диаграммы напряжения на фидере. На основании полученных данных, определены режимы коммутации в электрических сетях, оказывавшие наиболее негативное влияние на работу электрооборудования, как в целом, так и на различные ее части.

Ключевые слова: система электроснабжения, электрические сети, коммутационные режимы, переходные процессы, высокочастотные перенапряжения, математическая модель.

FTAMP 44.29.31

<https://doi.org/10.48081/GUSI7447>

**Ж. Б. Исабеков¹, *Б. Б. Исабекова², Б. Е. Ордабаев³,
А. Б. Жантлесева⁴, Л. Н. Есмаханова⁵**

^{1,2,3}Торайғыров университеті, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.;

⁴С. Сейфуллин атындағы Қазақ мемлекеттік университеті,
Қазақстан Республикасы, Астана қ.;

⁵М. Х. Дулати атындағы Тараз университеті,
Қазақстан Республикасы, Тараз қ.

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3980-1617>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5044-3211>

³ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-5457-3490>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3730-0579>

⁵ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3308-9676>

*e-mail: asbizh@mail.ru

ЖЕРГЕ ТҰЙЫҚТАЛУ ТОГЫН АНЫҚТАУДЫҢ ЭКСПЕРИМЕНТТІК ӘДІСТЕРІ

Бұл жұмыста релік қорғаныста қолданылатын оқшауланған бейтарап электр желілеріндегі жерге тұйықталу токтарын анықтаудың эксперименттік әдістері қарастырылады. Жерге тұйықталу токтарын анықтаудың дәлдігін арттыруға бағытталған әртүрлі тәсілдерге назар аударылады, бұл электр қондырғыларының қауіпсіз жұмыс істеуін қамтамасыз ету үшін өте маңызды. Параметрлерді бағалау, сондай-ақ олардың артықшылықтары мен шектеулерін талдау үшін желінің жұмыс кернеуін қолданатын әдістерге ерекше назар аударылады.

Қолданыстағы әдістерге шолу желіде жасанды асимметрияны құруға негізделген дәстүрлі әдістер әрқашан жеткілікті дәлдікті қамтамасыз етпейтінін анықтады. Сонымен қатар, фазалардың бірін жерге қосымша резистор арқылы жабу әдісі қарастырылады. Бұл тәсіл желінің қорғаныс құрылғыларының жалған дабылдарын болдырмайды және сонымен бірге Жерге қатысты фазалық сыйымдылықты есептеу кезінде ескерілмейтін көптеген желі параметрлерін ескереді. Бұл әдісті релік қорғаныста қолдану үшін ерекше тартымды етеді.

Жерге тұйықталу токтарын анықтау саласындағы әдістер мен бағыттарға жасалған бұл шолу фазаны жерге тұйықтау үшін қосымша резисторды қолдану ең тиімді шешімдердің бірі болып табылады деген қорытынды жасауға мүмкіндік береді. Бұл әдіс токтың сыйымдылық компонентін өтеу құрылғыларының жұмысын ескереді және осылайша жерге тұйықталу токтарын анықтаудың дәл әдісін ұсынады.

Кілтті сөздер: жерге тұйықталу тогы, эксперименттік әдістер, оқшауланған бейтарап желі, релелік қорғаныс, токтарды анықтау дәлдігі

Кіріспе

Әлемдік тәжірибеде оқшауланған бейтарапты желідегі жерге тұйықталу токтарын анықтаудың көптеген әдістері белгілі [1; 2; 3]. Оларды жіктеудің де сипаттары баршылық. Сондай-ақ әртүрлі датчиктер мен заманауи технологияларды, мысалы, жоғары дәлдіктегі өлшеу құрылғылары мен цифрлық бақылау жүйелерін пайдалана отырып, ақаулық ток параметрлерін бағалауға мүмкіндік беретін эксперименттік тәсілдер де бар. Бұл әдістер сенімді релелік қорғанысты қамтамасыз ету және электр қондырғыларындағы апаттар қаупін азайту үшін жаңа мүмкіндіктер туғызады.

Дегенмен, релелік қорғаныс тұрғысынан бұл әдістердің ең перспективалысы өлшенетін кернеу ретінде желінің жұмыс кернеуін пайдаланатын әдістер болып табылады [4; 5; 6]. Осының негізінде оқшауланған бейтарапты желідегі жерге тұйықталу токтарын анықтау үшін төмендегі әдістерді қолдануға болады.

Материалдар мен әдістері

Ең қарапайым, сондықтан ең сенімді әдіс жерге тұйықталу тогын тікелей анықтау болып табылады. Бұл әдісте оқшауланған бейтарап симметриялы желіде фазалардың бірі жерге қосқыш арқылы жасанды түрде қосылады, бұл жерге тұйықталу тогын өлшеуге мүмкіндік береді. Бұл әдіс практикалық әсерге және ағымдағы параметрлердегі өзгерістерді тіркеуге негізделген, бұл оны жеткілікті дәл және талдауға ыңғайлы етеді.

Бұл әдіс бойынша оқшауланған бейтарап симметриялы желіде оның фазаларының бірін қосқышпен жерге қосады және жерге тұйықталу тогы I_3 өлшенеді.

Егер электр қондырғысының жерге қатысты $Z_{из}$ оқшаулау кедергісінің шамасы қажет болса, онда вольтметр мен кернеу трансформаторының көмегімен фазаның жерге қатысты кернеуі U_ϕ қосымша өлшенеді. Олай болса жерге қатысты электр қондырғысының фазалық оқшаулау кедергісінің шамасы

$$Z_{из} = U_\phi / I_3 \text{ болады.} \quad (1)$$

Алайда, фазаның жерге тікелей тұйықталуы, әдетте, осы желінің релелік қорғанысының жерге тұйықталуы салдарынан өндіріс процесінің бұзылуына әкеледі. Нөлдік тізбектегі кернеуді және фазалық кернеулердің бірін өлшеу нәтижелері бойынша жерге тұйықталу тогын анықтау әдісінде бұл кемшілік болмайды [6, 47–49 бб.].

Бұл кернеулер фаза A мен жер арасында қосымша қарсылық енгізілгенге дейін және одан кейін өлшенеді. Нәтижесінде жерге бір фазалы тұйықталу тогы төмендегі формуламен анықталады:

$$I_3 = \dot{U}_A / Z_{изA}, \quad (2)$$

бұл ретте қосымша өткізгіштікті A енгізу кезінде толық кедергі $Z_{изA}$, сондай-ақ оның электр қондырғысы оқшауламасының белсенді $R_{из}$ және сыйымды $X_{с,из}$ құрамдас бөліктері келесі түрде жүзеге асырылады

$$Z_{изA} = Z_{\partial A} \frac{\dot{U}_A - \dot{U}_{0e}}{\dot{U}_{0и} - \dot{U}_{0e}} = R_{из} - jX_{с,из} \quad (3)$$

мұнда U_A – значение вектора напряжения фазы A желісінің кернеу векторының мәні, В;

$U_{0и}$ – қосымша қарсылықты қосқаннан кейінгі бейтарап кернеудің орын ауыстыру векторының мәні.

Дегенмен, оқшауланған бейтарап желілер әдетте жерге қатыстылығы тұрғысынан бейасимметриялы. Бұл, мысалы, сызықтардың фазалық өткізгіштерінің ұзындығының теңсіздігінен және фазалық өткізгіштердің жерден әр түрлі қашықтығынан туындайды. Нәтижесінде электр қондырғысының нөлдік нүктесі мен жер арасында бейтараптың табиғи кернеуінің орын ауыстыруы U_{0e} пайда болады. Бұл жағдайда

$$Z_{изA} = Z_{\partial A} \frac{\dot{U}_A - \dot{U}_{0e}}{\dot{U}_{0и} - \dot{U}_{0e}} = R_{из} - jX_{с,из} \quad (4)$$

Бірақ бұл әдісті қолдану шектеулі. Өте жоғары дәлдікпен бұл әдіс $0 < U_{0e} < 0,25 U_\phi$ болған жағдайда ғана қолданылады. Бейтараптылық пен жер арасында қосымша қарсылық $Z_{\partial 0}$ енгізілгенде ғана, бұл аймақты кеңейтуге болады. Нәтижесінде

$$Z_{из} = Z_{00} \frac{\dot{U}_{0e} - \dot{U}_{0и}}{\dot{U}_{0и}} \quad (5)$$

болады, ал қолдану саласы $0,25 U_{\phi} < U_{0e} < 0,5 U_{\phi}$ мәніне дейін кеңейтіледі.

Мұндай жағдайларда жерге тұйықталу тогын анықтау үшін нөлдік тізбектегі кернеу мен ток модульдерін өлшейтін әдісті қолдану ыңғайлы [7, 156-162 бб.].

Бұл әдісті жүзеге асыру үшін үш фазалы трансформатор қолданылады, онда бейтараптың орын ауыстыру кернеуі U_{0e} және нөлдік тізбектің тогы I_{0e} дәйекті түрде өлшенеді. Электр қондырғысының жерге қатысты оқшаулауының толық кедергісі және жерге тұйықталу тогы төмендегідей анықталады

$$Z_{из} = \frac{U_{0e}}{I_{0e}} = \frac{R_{из} X_{из}}{\sqrt{R_{из}^2 + X_{из}^2}} \quad \text{и} \quad I_{из} = U_{\phi} \dot{I}_{0e} / \dot{U}_{0e} \quad (6)$$

Жерге тұйықталу тогының компоненттерін, сондай-ақ толық кедергінің $Z_{из}$ ыдырауын анықтау үшін $R_{из}$ және $X_{из}$ құрамасы және келесі қосымша өлшемдер жасалуы керек. Амперметрмен тізбектей жалғанған X_{ϕ} белгілі сыйымдылықты немесе R_{ϕ} белсенді кедергіні қосу кезінде U_X немесе U_R кернеулері жасанды нөлдік нүкте мен жер арасында өлшенеді. Бұл жағдайда осы амперметрдің көрсеткіштері I_X немесе I_R токтары түрінде жазылады. I_X немесе I_R токтарын және Z_X немесе Z_R кернеуді өлшеу нәтижелері бойынша толық қарсылық ретінде анықталады

$$Z_X = \frac{U_X}{I_X} = \sqrt{Z_{из}^2 + \frac{2Z_{из}^2}{X_{из}^2} X_{\phi} + X_{\phi}^2} \quad \text{и} \quad (7)$$

$$Z_R = \frac{U_R}{I_R} = \sqrt{Z_{из}^2 + \frac{2Z_{из}^2}{X_{из}^2} R_{\phi} + R_{\phi}^2}$$

Оқшаулау кедергісінің құрамдас бөліктерінің $R_{из}$ және $X_{из}$, сондай-ақ оларға сәйкес келетін токтардың шамалары келесі формулалары бойынша анықталады [7, 156–162 бб.].

Әдісі жерге тұйықталу тогын [8, 98 б.] және жерге қатысты электр қондырғысының оқшаулау кедергісін барлық үш фазаның тізбегі бойынша L_{ϕ} дроссель арқылы жерге тұйықталу кезіндегі нөлдік тізбектегі кернеу мен токтарды өлшеу нәтижелері бойынша анықтауға негізделген. Және [9, 122 б.] әдістерінің дамуы болып табылады.

Сәйкес бұл әдіс [8, 98 б.] U_{0A} , U_{0B} және U_{0C} кернеулерінің орташа мәндерін және дроссель арқылы өтетін $I_{\phi A}$, $I_{\phi B}$ және $I_{\phi C}$ токтардағы бейтараптың орын ауыстыруын және оны желінің А, В және С фазаларына кезек-кезек қосуды ұсынады.

Нәтижесінде, бейтараптың орын ауыстыру кернеулерінің орташа мәні және оны желінің тиісті фазаларына қосқан кезде индуктивтілік арқылы өтетін токтар

$$U_{0cp} = \frac{U_{0A} + U_{0B} + U_{0C}}{3} \quad \text{және} \quad I_{cp, \phi p} = \frac{I_{\phi A} + I_{\phi B} + I_{\phi C}}{3}.$$

Олай болса, электр қондырғысының оқшаулау кедергісінің шамасын төмендегідей есептеуге болады.

$$Z_{из} = \frac{U_{0\phi p}}{I_{\phi p, cp}}, \quad \text{где} \quad U_{0\phi p} = \frac{U_{0cp} \times 100}{100 + b\%}; \quad (8)$$

b – желі фазасы мен жер арасындағы индуктивтіліктің пайызбен қосылуына байланысты орын ауыстыру кернеуінің шамасын анықтаудағы ақау.

Бұл жағдайда жерге тұйықталу тогы

$$\dot{I}_{из} = \dot{U}_A / Z_{из}. \quad (9)$$

Нәтижелер және талқылау

Әдісі электр қондырғысының А фазасы [10, 60-70 бб.] мен қосымша сыйымдылықтағы C_d жер арасындағы қосылымға дейін және кейін сызықтық кернеуді U_{BC} , сондай-ақ жерге қатысты фазалық кернеуді өлшеуге негізделген. Өлшенетін кернеулер тоқ таратылатын желідегі фазалардың тікелей ауысуы кезінде жүзеге асырылады 6–10 кВ U_A , U_B және U_C болып, ал фазалардың кері ауысуы – U_A , U_B және U_C болып белгіленеді.

Өлшеу нәтижелері бойынша желіні оқшаулау өткізгіштігінің жиынтық белсенді компоненті

$$g_{\Sigma} = \frac{1}{r_{\Sigma}} = \frac{\omega C_{\phi} (da' - d'a)}{(a - a')^2 + (d - d')^2} \quad (10)$$

болады, ал жерге қатысты электр желісінің фазаларының жалпы сыйымдылығы

$$C_{\Sigma} = \frac{C_0[a'(a-a') + (d-d')]}{(a-a')^2 + (d-d')^2} \quad (11)$$

болады, $a = \frac{2U_A^2 - (U_B^2 + U_C^2)}{6U_{\phi}} + U_{\phi}$ мұндағы және;

$$d = \frac{U_C^2 - U_d^2}{2\sqrt{3}U_{\phi}} \text{ және } d' = \frac{U_C'^2 - U_d'^2}{2\sqrt{3}U_{\phi}}.$$

Егер қосымша сыйымдылықтың орнына R_0 резисторы қолданылса, онда желінің оқшаулау өткізгіштігінің жалпы белсенді компоненті және оның жерге қатысты фазаларының жалпы сыйымдылығы сәйкесінше тең болады

$$g_{\Sigma} = \frac{1}{R_{\Sigma}} = \frac{a'(a-a') + d(d-d')}{R_d(a-a')^2 + (d-d')^2} \text{ және } C_{\Sigma} = \frac{1}{R_d} = \frac{d'(a'-a) + a'(d'-d)}{(a-a')^2 + (d-d')^2}. \quad (12)$$

Жоғарыда көрсетілгендей желінің табиғи асимметриясы болған кезде нөлдік тізбектегі кернеуді төмендегі формуламен көрсетуге болады

$$\dot{U}_0 = \dot{U}_{0e} + \dot{U}_{0u}. \quad (13)$$

Бұл жағдайда бейтараптың табиғи орын ауыстыру U_{0e} кернеуі тек C_A , C_B және C_C сыйымдылықтарының, А, В және С фазаларының және жерге қатысты табиғи асимметриясына байланысты деп саналады. Бейтараптың жасанды орын ауыстыруы U_{0u} кез-келген фазалар мен C_0 қосымша сыйымдылықтағы жер арасында қосылады.

Шынында да, C_0 қосымша сыйымдылықты қосу, мысалы, желінің А фазасына U_A' , U_B' , U_C' кернеулерін, желінің жерге қатысты фазаларын, U_0 бейтараптың орын ауыстыру кернеуін және А фазасының тұйықталу тогы арасындағы φ бұрышты жерге және қосымша сыйымдылық пен U'_{BC} фазааралық кернеу арқылы өзгертеді.

Кернеу әдісін жүзеге асыру кезінде U_A' , U_B' , U_C' және U'_{BC} кернеуді өлшеу трансформаторының бірінші екіншілік жағында, ал кернеу U_0 ашық үшбұрыштың схемасы бойынша қосылған екінші қысқышта өлшенеді

Нәтижесінде жерге қатысты желінің сыйымдылығын анықтау үшін

$$C_{из} = C_0 \left(\frac{U_{\phi} k_{mn}}{U_0 k'_{mn}} - 1 \right), \quad (14)$$

мұнда U_{ϕ} – қалыпты режимдегі кернеуді өлшеу трансформаторының фазалық терминалдарындағы екіншілік кернеу, В;

k_{mn} – кернеу трансформаторының трансформация коэффициенті;

k'_{mn} өлшеу кезіндегі кернеу трансформаторының трансформация коэффициенті U_0

Әдістің ақаулығын азайту үшін қосымша сыйымдылықтың мөлшері төмендегідей анықталады. Бастапқыда желінің қалыпты жұмыс режимінде фазалық кернеулер өлшенеді және орташа мән U_{ϕ} есептеледі. Содан кейін бейтараптың табиғи орын ауыстыру кернеуін U_{0e} өлшейді және параметрдің ең төменгі рұқсат етілген мәнін k_c келесідей анықтайды

$$k_{cmin} = \frac{1,05 U_{0e}}{0,05 U_{\phi} - U_{0e}}. \quad (15)$$

Әуе және кабель желілерінің белгілі ұзындықтары бойынша [10] жерге тұйықталу тогының болжамды шамасын I_{cn} есептейді және шарт бойынша қосымша сыйымдылықтың болжамды шамасы C_0 анықталады.

$$\frac{k_{cmin} I_{cn}}{\omega U_{\phi}} < C_0 < \frac{I_{cn}}{\omega U_{\phi}}. \quad (16)$$

Қорыта айтқанда, емкость величиной C_0 көлеміндегі сыйымдылықты желінің фазаларының біріне қосып, U_{0u} бейтараптың жасанды орын ауыстыру кернеуін өлшейді. Жерге және жерге тұйықталу тогына қатысты желі сыйымдылығының шамасы $C_{из}$ (14 және 1) формулалар бойынша есептеледі.

Қаржыландыру туралы ақпарат.

Зерттеуді Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитеті қаржыландырады (грант №АР23486411).

Қорытынды

Релелік қорғаныс мақсатында жерге тұйықталу токтарын анықтау саласындағы негізгі үрдістерге жасалған бұл шолу жерге тұйықталу тогын жанама анықтау үшін желіде жасанды асимметрия құру жоғары дәлдікті қамтамасыз ете алмайды деген қорытынды жасауға мүмкіндік береді. Сонымен қатар, қосымша резистор арқылы фазадан жерге қысқа тұйықталу, бір жағынан, осы желінің «жер» қорғанысының жалған жұмысына әкелмейді, ал екінші жағынан, желілік фазалардың жерге қатысты сыйымдылығын есептеу кезінде ескеру мүмкін емес көптеген желі элементтерін ескереді. Егер жерге тұйықталу тогының сыйымдылық құрамдас бөлігін өтеуге арналған құрылғылардың жұмысын ескеретін болсақ, онда бұл қазіргі уақытта бұл мәселені шешудің ең шынайы әдістерінің бірі болып табылады.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 **Валов, В. Н., Ширковец, А. И., Ильиных, М. В., Хадыев, И. Г., Макарьев, А. О.** Определение тока однофазного замыкания на землю на основе натурного эксперимента с осциллографированием. // Релейная защита и автоматизация. – 2021. – № 3. – С. 104–113.
- 2 **Щуцкий, В. И., Гущин, Н. Я.** Методика исследования состояния изоляции сетей 6 кВ // Безопасность труда в промышленности. – 1973 – № 10 – С. 47–49.
- 3 **Важов, В. Ф., Лавринович, В. А.** Техника высоких напряжений / Учебник для бакалавров направления 140200 «Электроэнергетика» – ТПУ, 2014. – 263 с.
- 4 **Шалин, А. И., Политов, Е. Н.** Анализ характеристик направленных защит от замыканий на землю в сетях 6–35 кВ / Энергетика: экология, надежность, безопасность. Материалы докладов восьмой всероссийской научно-технической конференции. – Томск : изд-во ТПУ, 2002. – Том 2. – С. 35–39.
- 5 **Гладилин, Л. В., Карелин, В. И.** Измерение сопротивления изоляции кабельных распределительных электрических сетей и установок напряжением 6–35 кВ. // Изв. вузов. Горный журнал. – 1974 – №10 – С. 156–162.
- 6 **Лурье, А. И.** Электрические измерения в сетях сильного тока. – Л.-М. : Госэнергоиздат, 1948. – 384 с.
- 7 **Цапенко, Е. Ф.** Замыкания на землю в сетях 6–35 кВ. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 128 с.
- 8 **Новожилов, А. Н., Исабеков, Ж. Б., Новожилов, Т. А.** Конфигурация кабельных электрических сетей 6-10 кВ // Вестник ПГУ. Серия Энергетическая. – 2017. – № 3. – С. 107–115.
- 9 **Новожилов, А. Н., Исабеков, Ж. Б.** Повышение надежности работы кабельных сетей при однофазных замыканиях на землю // Вестник ПГУ. Серия Энергетическая. – 2015. – № 3. – С. 88–97.
- 10 **Issabekov, Zh. B., Novozhilov, A. N., Novozhilov, T. A., Issabekova, B. B.** Protection of a two-cable line from single phase-to-earth fault with absolute selectivity. // NEWS of the Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of geology and technical sciences. – 2018. – V.5(431). – P. 128–132.

REFERENCES

- 1 **Valov, V. N., Shirkovetz, A. I., Ilyin, M. V., Xadyev, I. G., Makarev, A. O.** Opredelenie toka odnofaznogo zamykaniya na zemlyu na osnove naturnogo eksperimenta s oscillografirovaniem. [Determination of the single-phase earth fault current based on a field experiment with oscillography.] // Relay protection and automation. – 2021. – No. 3. – P. 104–113.

- 2 **Shhuczkij, V. I., Gushhin, N. Ya.** Metodika issledovaniya sostoyaniya izolyacii setej 6 kV [Methodology for studying the state of insulation of 6 kV networks] // Occupational safety in industry. – 1973 – No. 10 – P. 47–49.
- 3 **Vazhov, V. F., Lavrinovich, V. A.** Texnika vy'sokix napryazhenij [High voltage engineering] / Textbook for bachelors of the direction 140200 «Electric power engineering». 2014. – 263 p.
- 4 **Shalin, A. I., Politov, E. N.** Analiz xarakteristik napravlenny'x zashhit ot zamykaniy na zemlyu v setyax 6–35 kV [Analysis of the characteristics of directional earth fault protection in 6-35 kV networks] / Energy: ecology, reliability, safety. Materials of the reports of the eighth All-Russian scientific and technical conference. Tomsk: TPU Publishing House, 2002. – Vol. 2. – P. 35–39.
- 5 **Gladilin, L. V., Karelin, V. I.** Izmerenie soprotivleniya izolyacii kar'erny'x raspredelitel'ny'x elektricheskix setej i ustanovok napryazheniem 6-35 kV [Measurement of insulation resistance of quarry distribution electric networks and installations with a voltage of 6-35 kV.] // Izv. vuzov. Mining journal. – 1974 – No. 10 – P. 156–162.
- 6 **Lur'e, A. I.** Elektricheskie izmereniya v setyax sil'nogo toka [Electrical measurements in high current networks.] – L.-M.: Gosenergoizdat, 1948. – 384 p.
- 7 **Czapenko, E. F.** Zamykaniya na zemlyu v setyax 6-35 kV [Earth faults in 6-35 kV networks.] – M.: Energoatomizdat, 1986. – 128 p.
- 8 **Novozhilov, A. N., Issabekov, Zh. B., Novozhilov, T. A.** Konfiguraciya kabel'ny'x elektricheskix setej 6-10 kV [Configuration of 6-10 kV cable electric networks] // Bulletin of PSU. The series is Energetic. – 2017. – No. 3. – P. 107–115.
- 9 **Novozhilov, A. N., Issabekov, Zh. B.** Povy'shenie nadezhnosti raboty kabel'ny'x setej pri odnofazny'x zamykaniy na zemlyu [Improving the reliability of cable networks with single-phase earth faults] // Bulletin of PSU. The series is Energetic. – 2015. – No. 3. – P. 88–97.
- 10 **Issabekov, Z. B., Novozhilov, A. N., Novozhilov, T. A., Issabekova, B. B.** Protection of a two-cable line from single phase-to-earth fault with absolute selectivity. // NEWS of the Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of geology and technical sciences. – 2018. – V.5(431). – P. 128–132.

09.11.24 ж. баспаға түсті.

08.04.25 ж. түзетулерімен түсті.

05.09.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

Ж. Б. Исабеков¹, *Б. Б. Исабекова², Б. Е. Ордабаев³,
А. Б. Жантлесева⁴, Л. Н. Есмаханова⁵

^{1,2,3}Торайғыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар

⁴Казахский государственный университет имени С. Сейфуллина,

Республика Казахстан, г. Астана

⁵Таразский университет имени М. Х. Дулати,

Республика Казахстан, г. Тараз

Поступило в редакцию 09.11.24

Поступило с исправлениями 08.04.25

Принято в печать 05.09.25

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТОКА ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ

В данной работе рассматриваются экспериментальные методы определения токов замыкания на землю в электрических сетях с изолированной нейтралью, используемые в релейной защите. Внимание уделено различным подходам, направленным на повышение точности определения токов замыкания на землю, что особенно важно для обеспечения безопасной работы электроустановок. Особое внимание уделено методам, использующим рабочее напряжение сети для оценки параметров, а также анализу их преимуществ и ограничений.

Обзор существующих методов выявил, что традиционные способы, основанные на создании искусственной несимметрии в сети, не всегда обеспечивают достаточную точность. В качестве альтернативы рассматривается метод замыкания одной из фаз на землю через дополнительный резистор. Такой подход позволяет избежать ложных срабатываний защитных устройств сети и одновременно учитывать многочисленные параметры сети, которые невозможно учесть при расчетах фазной емкости по отношению к земле. Это делает метод особенно привлекательным для использования в релейной защите.

Этот обзор методов и направлений в области определения токов замыкания на землю позволяет сделать вывод, что применение дополнительного резистора для замыкания фазы на землю является одним из наиболее эффективных решений. Данный метод учитывает работу устройств компенсации емкостной составляющей тока и, таким образом, предоставляет более точный способ определения токов замыкания на землю.

Ключевые слова: ток замыкания на землю, экспериментальные методы, сеть с изолированной нейтралью, релейная защита, точность определения токов

Zh. B. Issabekov¹, *B. B. Issabekova², B. Y. Ordabayev³,

*A. B. Zhantlessova⁴, L. Yesmakhanova⁵

^{1,2,3}Toraigyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar

⁴Kazakh State University named after S. Seifullin,

Republic of Kazakhstan, Astana

⁵M. Kh. Dulaty Taraz University, Republic of Kazakhstan, Taraz

Received 09.11.24

Received in revised form 08.04.25

Accepted for publication 05.09.25

EXPERIMENTAL METHODS FOR DETERMINING THE EARTH FAULT CURRENT

This paper discusses experimental methods for determining ground fault currents in electrical networks with an isolated neutral used in relay protection. Attention is paid to various approaches aimed at improving the accuracy of determining ground fault currents, which is especially important to ensure the safe operation of electrical installations. Special attention is paid to methods that use the operating voltage of the network to evaluate parameters, as well as to analyze their advantages and limitations.

A review of existing methods has revealed that traditional methods based on creating artificial asymmetry in the network do not always provide sufficient accuracy. As an alternative, the method of closing one of the phases to the ground through an additional resistor is considered. This approach allows you to avoid false alarms of network protection devices and at the same time take into account numerous network parameters that cannot be taken into account when calculating the phase capacitance relative to the ground. This makes the method particularly attractive for use in relay protection.

This review of methods and directions in the field of determining ground fault currents allows us to conclude that the use of an additional resistor for phase closure to ground is one of the most effective solutions. This method takes into account the operation of devices for compensating the capacitive component of the current and, thus, provides a more accurate way to determine ground fault currents.

Keywords: earth fault current, experimental methods, network with isolated neutral, relay protection, accuracy of current detection

<https://doi.org/10.48081/LKOF1047>**Д. Д. Исабеков**

Торайғыров университеті, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6673-5646>e-mail: Dauren_pvl2012@mail.ru**КЕРНЕУІ 1000-ҒА ДЕҢІНГІ
ЭЛЕКТРҚОНДЫРҒЫЛАРЫНА АРНАЛҒАН
РЕСУРС ҮНЕМДЕУ КОНСТРУКЦИЯСЫ**

Мақалада автор жүк көтергіш механизмдер (ЖКМ) үшін, атап айтқанда дәстүрлі соңғы ажыратқыштарға балама болып табылатын көпір краны үшін әзірленген ресурс үнемдеу құрылымын ұсынады. Зақымданудан электр қондырғыларына арналған ресурс үнемдейтін құрылғылар мен конструкцияларды жасау өткен ғасырдың ортасында басталған, ол бүгінгі күні де өзекті болып қалады. Көтеру-тасымалдау машиналары (КТМ) көтеріп-тасымалдау, тиіп түсіру, құрылыс-монтаж жұмыстарында және өндірісті механизацияландыру мен автоматтандырудың аса тиімді жабдығы ретінде халық шаруашылығының әртүрлі саласында, соның ішінде өнеркәсіпте, құрылыста, көлікте, тау-кен, металлургия, машинажасау салаларында кеңінен таралған. Осы салалардың барлығында жалпы қолданыстағы көтеру-тасымалдау машиналарының көп түрлері пайдаланылады. Олар тасымалданатын жүктердің түрлері мен жалпы қасиеттерінің ерекшеліктерімен сипатталады, сонымен қатар өндірістің кез келген саласында тасымалданатын жүктердің тасымалдау траекториясы мен геометриялық формасына байланысты қабылданады. Ондай машиналарды қолдану ауыр қол жұмыстарын жеңілдетеді, еңбек өнімділігін арттыруға мүмкіндік береді. Жұмыстың ғылыми жаңалығы геркондағы конструкцияларды құру теориясын одан әрі дамытудан тұрады. Әртүрлі режимдердегі және көпірлі кранның нүктелеріндегі магниттік өрістердің индукциясын негізге ала отырып, оның элементтерінің орын ауыстыруын бақылау операцияларын орындайтын альтернативтік конструкцияны іске

асыру толығымен орындалатыны көрсетілген. Мұндай конструкцияда шеткі ажыратқыштар пайдаланылмайды, ал олардың орнына геркон пайдаланылады. Ол тұрақты магнитпен жасалатын магнит өрісіне әрекет ете отырып, бір мезгілде ток датчигі және өлшеу құрылғысы ролінде әрекет етеді. Магниттік өрісті қабылдау үшін герконды рұқсат етілген минималды қашықтықты сақтай отырып, тұрақты магнитке жақын орнатады. Зерттеудің мақсаты көпір кранының мысалында басқа жүк көтергіш механизмдерге қолдануға болатын, герконда орындалған жаңа ресурс үнемдейтін қорғанысты әзірлеу болып табылады.

Кілтті сөздер: көпірлі кран, арба, геркон, индукция, ресурс үнемдеу.

Кіріспе

Электр энергетикасындағы ресурс үнемдеу мәселесі қазір де өзекті болып қала отырып, үлкен энергетикалық жүйелер-CIGRE жөніндегі халықаралық кеңестерде бірнеше рет көтерілді [1; 2]. Осыған байланысты техникалық параметрлері бойынша оларға кем түспейтін альтернативтік құрылғылар мен конструкцияларды іздестіру жөніндегі жұмыстар, сонымен бір мезгілде пайдаланылатын материалдардың ресурсты үнемдеу әсері барған сайын өзекті бола түсуде. Сонымен басқа элементтік базада орындалған қорғаудың жаңа конструкцияларын әзірлеу қажет [3]. Ресурс үнемдеу құрылымын құрудың перспективалы тәсілдерінің бірі герконды қолдану болып табылады [4]. Мысалы, альтернативтік ретінде электромагниттік өрістердің әсеріне негізделген әртүрлі магнитті сезімтал элементтерге құрылған бірқатар қорғаныстар бар, мысалы оның ішінде, магнитотранзисторлар, магнитодиодтар, магнитрезисторлар [5], Холл датчиктері [6], Роговский катушкалары [7] және геркондар [8; 9]. Ұсынылатын конструкцияда геркон екі функцияны орындайды: ол бір мезгілде тұрақты магнитпен жасалатын токтың датчигі және магнит өрісінің өлшеу органы болып табылады. Геркон магнит өрісіне әсер етуі үшін ол тұрақты магнитке тікелей жақын орнатылады. Заманауи көтеру-тасымалдау машиналар өндірісін ұйымдастыруда жеке блокты бөліктер мен жаңа конструкцияларды жасауды біріздендіруге негізделеді, демек машинажасау мен оларды пайдалану кезінде сапаны жоғарылатуға және ең жоғары техник-эко номикалық тиімділігін алуға мүмкіндік туындайды. КТМ-ның қолданыстағы паркін пайдалану кезінде олардың конструкциясы мен техникалық мүмкіншіліктерін жетілдіру орындалатын жұмыстарының тиімділігін арттыру мақсатында жүргізіледі. Осы жағдайға сәйкес құрылысшы жоғары механикаландырылған құрылысты ұйымдастырушы және жетекші ретінде құрылыс машиналарының жұмыс

атқару негізі мен құрылымын, олардың өнімділігіне және жұмыс сапасына әсер етуші факторларды, сонымен қатар, машиналарды дұрыс таңдап, тиімді пайдалана білуі өте қажет. Кран деп, үлкен емес арақашықтыққа жүкті горизонтальді орын ауыстыруға және көтеру немесе түсіруге арналған жүк көтергіш машиналарды айтады. Ұсынылған жұмыста көпірлі кран элементтерімен жүргізілетін барлық манипуляциялар Электр қондырғылары құрылғыларының ережелеріне (ЭҚЕ) сәйкес орындалған [10].

Материалдар мен әдістері

Электртізбегінің құрамындағы геркон оған басқарушы магнит өрісінің әсері кезінде механикалық тұйықталу немесе ажыратылу арқылы оның жай-күйін өзгертетін байланыс болып табылады [4; 9]. Бұл жұмыста геркон электр тізбегінің элементі бола отырып, өлшеу органы ретінде әрекет етті. Инертті газбен толтырылған шыны баллонның ішіне сіңген оның ферромагниттік екі байланысы бір-бірін жаба отырып, байланысатын беттерді құрайды. Тұрақты магнитпен жасалған сыртқы магнит өрісінің герконына әсер етуімен түйіспелердің ұштары әртүрлі атаулы магниттеледі, олардың ұштары иіліп, электр тізбегін тұйықтап тартылады.

Нәтижелер және талқылау

Конструкция түрінде ұсынылған ресурс үнемдеу қорғанысы жүк көтергіш механизмдерді, атап айтқанда көпір кранын қорғауға арналған. Бұл ретте ол кран көпірінде орналасқан арбаның жүрісін, сондай-ақ кран көпірінің қозғалысын реттеу үшін бақылауды жүзеге асырады. Бұл қорғау 1000В дейінгі кернеудегі электрқондырғыларын қорғауға жатады және оның ішіне кіретін геркон (1) тұйықталатын контактері (2) және (3), (4), (5) және (6) ажыратылатын контактері мен (1-сурет), екі сигналдық шамдары (7–8) кранның кабинасында (9) орнатылған бар (1-сурет). Сондай-ақ оның құрамына жедел ток көзі(10) кіреді, ол ретінде ток өткізгіш троллейлер пайдаланылады, пластина (11) хомут (12) көмегімен геркон (1) бекітіледі, ол механикалық зақымданудан қорғау мақсатында қақпақпен (13) жабылған. Геркондардың (1) ажыратқыш контактері (3)–(6) клемниктердің (14) көмегімен контроллеріне (15) кран арбасының (16) және контроллеріне (17) көпір (18) қосылған. Автоматтың ВА1(19) кіруі жедел ток көзіне (10) қосылған. Автоматты ВА1(19) шығуына көпірлі кранды басқару тізбектері, балқымалы сақтандырғыштары ПР1 (20) көмегімен қосылған. Осы сақтандырғыштардың біріншісінің шығуына кабинасының люк контакт ВКЛ(21) көмегімен автоматты ВА2(22) қосылған. Осы ажыратқыштың шығуына контакт РМ(23), релесінің РМ1(24) жүкті көтеру электрқозғалтқыштың М1(25) ток бақылауға қосылған, ток бақылау релесі РМ2(26) кран арбасының (16) электрқозғалтқышында М2(27) жүрісінің және токты бақылау релесінде РМ3(28) көпір жүрісі (18) электрқозғалтқышында

М3(29) және контакт РМО(30) ток өткізгіш троллейлердегі токты бақылау РМО1(31) және РМО2 (32) релерін (2-сурет). РМО(30) контактің шығуына КЛ1.2(33) контактердің КЛ1(34) қосалқы тұйықталу контактісі бар қосылған. Екінші сақтандырғышының ПР1(20) шығысына «іске қосу» батырма КнП(35) қосылған, оған параллель жүкті көтеру механизмінің соңғы ажыратқышы ВККП(36) орнатылған. КнП(35) кнопкасының шығуына арбаның (16) және көпірдің (18) жүрісін бақылау үшін герконның (1) ажыратқыш контакт (3-6) көмегімен (15) және (17) контакторлар қосылған. Автоматты ВА1(19) шығуына контактордың КЛ1(33) тұйықталуына негізгі контактар КЛ1.1(37) қосылған. Осы контактің шығуына ток өткізгіш троллейлердегі тоғын бақылау релесі РМО1(31), РМО2(32) және РМ1(24), РМ2(26) және РМ3(28) тоғын бақылау релесі көмегімен жүкті көтеру М1(25), арбаның жүрісі М2(27) және көпірінің жүрісі М3(29) электрқозғалтқыштары қосылған (2-сурет). Пластина (11) бірінші планкаға (38) бірінші шуруптардың (39) көмегімен бекітілген. Бірінші планка (38) бірінші негізде (40) екінші шуруптардың көмегімен бекітілген (41). Пластина (11) геркондармен (1) тұрақты магниттің (42) көлденең қимасының жазықтығына перпендикуляр орналастырып, пеналға (43) бекітілген. Осы пенал (43) екінші планкаға (44) үшінші шуруптардың (45) көмегімен бекітіледі. Екінші планка (44) екінші негізге (46) төртінші шуруптардың (47) көмегімен бекітіледі.

Кран арбасының (16) орын ауыстыруы кезінде шекті рұқсат етілген жағдайлардың өтуін болдырмау мақсатында кран арбасының корпусына бекітілген бірінші негіз (40) кран арбасының (16) корпусының екі жағына бесінші шуруптардың (48) көмегімен бекітіледі. Бірінші негізде (40) бірінші планка (38) және герконыдар мен (1) пластина (11) орнатылған. Екінші негізде (46) шеткі балкаға (49) алтыншы шуруптың (50) көмегімен бекітіледі (3-сурет).

Осы кранның көпірлін (18) шекті рұқсат етілген жағдайлардың өтуін болдырмау мақсатында бірінші негіз (40) буферлік құрылғыдан (51) жоғары бекітілген, онда бірінші планка (38) және герконмен (1) пластинада (11) орнатылған көпірге (18) бесінші шуруптардың (48) көмегімен бекітіледі. Екінші негіз (46) өндірістік үй-жайдың құрылыс конструкциясына (52) алтыншы шуруптардың (50) көмегімен бекітумен жүзеге асырылады (4-сурет).

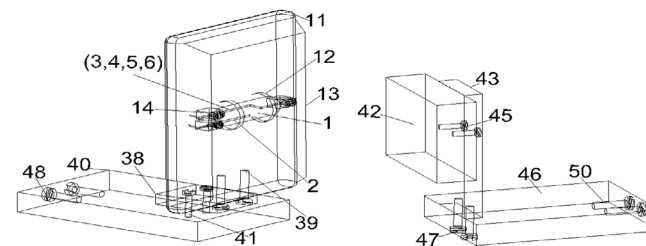
Көпірлі кранның ресурс үнемдеу қорғанысы былайша жұмыс істейді. Схеманы жұмысқа енгізу автоматты ВА1(19) қосу арқылы жүзеге асырылады, а ол өзі жедел ток көзіне (10) қосылған. Автоматтың ВА1(19) шығуға тоғы схеманың күштік және басқару тізбектері, «С» фазасында орнатылған бірінші балқыма сақтандырғыш ПР1 (20) көмегімен қосылған, кабинасы люгінің контактынан ВКЛ (21), автоматты ВА2(22), контакт РМ(23)

электрқозғалтқыштарындағы тоғын бақылау релесі РМ1(24), РМ2(26) мен РМ3(28) және ток бақылау релесіндегі РМО1(31) және РМО2(32) контакт РМО(30) ток өткізетін троллейлерде КЛ1 (33) контакторының катушкасын бірінші шығуға сонымен түседі. «В» фазасында орнатылған екінші балқымалы сақтандырғышы ПР1 (20) арқылы өтетін ток батырма КнП (35) арқылы және оған параллель орнатылған жүк көтергіштің соңғы ажыратқышы ВККП(36) арқылы келеді. Батырма КнП (35) басқанда ток контактор КЛ1 (33) катушкасының екінші шығысына түседі, осылайша оның іске қосылуын жүзеге асырады. Бұл ретте ВКЛ(21), ВА2(22), РМ(23), РМО (30) котактілері жабық болады. Бұдан кейін контактор КЛ1(33) көмекші контактілердің КЛ1.2(34) көмегімен өзін-өзі қоректендіру тізбегін жасайды, ол арбаның жүрісі (16) және көпірдің жүрісі (18) контактордан (15), (17) және герконның ажыратқыш контактілері (3-6) ден арқылы өтеді. ВКЛ(21) контактілерді сәтті тұйықтау үшін кранның кабинасының люгі (9) жабық болады. Бұдан әрі (15) және (17) контактарды нөлдік (О) жағдай бойынша орнатамыз. Бұдан басқа, осы котакторлар тағы екі ережесі бар: «В» – алға және «Н» - артқа. Контактор КЛ1 (33) іске қосылған кезде ток оның негізгі тұйықталуына арналған контактілер КЛ1.1 (37) ден өтеді. Осы контакттерден кейін ток ток бақылау релесі РМО1(31), РМО2(32) арқылы ток жеткізуші троллейлерде және электрқозғалтқыштарында ток бақылау релесінде РМ1(24), РМ2(26) және РМ3(28) жүкті көтеру (25), арбаның жүрісіне (27) және көпірінің жүрісіне (29) электрқозғалтқыштарына түседі (2-сурет).

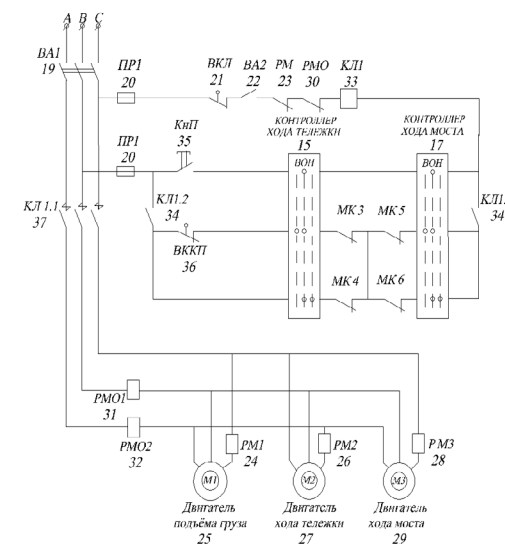
Кран арбасын (16) көпірдің (18) бір жағына ауыстырған кезде, контроллерді алға немесе артқа ауыстырған кезде, кран арбасының (16) корпусына бекітілген қорғаныс конструкциясы шекті рұқсат етілген жағдайларға қол жеткізе отырып, кранның көпірінде (18) орнатылған тұрақты магнитпен (42) жасалатын магнит өрісінің әсеріне түседі. Нәтижесінде герконның (1) ажыратқыш контактылары (3) немесе (4) бірі мезгілде басқару тізбекті үзіп және кран арбасының электрқозғалтқышын М2(27) жүрісін қарама-қарсы жаққа ауыстырып іске қосылады. Бұл ретте герконның (1) тұйықталатын контактпен (2) кранның кабинасында (9) орнатылған шам (7) арқылы машинистке сигнал беріледі. Бұні мен кран арбасының (16) кран көпірімен (18) соқтығысуын болдырмайды (3-сурет).

Кранды өндірістік ғимаратта бір жағына ауыстырған кезде, кранды алға немесе артқа ауыстырған кезде кранның көпіріне (18) бекітілген қорғаныс конструкциясы шекті рұқсат етілген жағдайларға қол жеткізе отырып, құрылыс конструкциясында (52) орнатылған тұрақты магнитпен (42) жасалатын магниттік өрістің әсеріне түседі. Нәтижесінде герконның (1) ажыратылатын контактері (5) немесе (6) біреу іске қосылады. Бұл ретте бір мезгілде басқару тізбегіндегі тізбек үзіледі және көпір жүрісінің электрқозғалтқышы М3 (29)

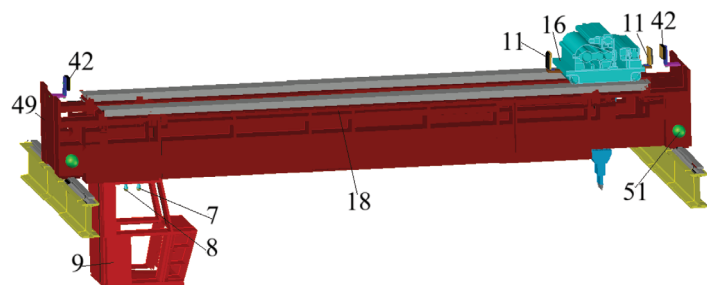
қарама-қарсы жаққа (реверске) ауыстырылады. Бір мезгілде герконның (1) тұйықталатын контактпен (2) кранның кабинасында (9) орнатылған шаммен (8) машинистке сигнал беріледі. Осылайша, буферлік құрылғының (51) көмегімен көпірдің (18) өндірістік ғимаратпен құрылыс конструкциясымен (52) соқтығысуының алдын алынады (4-сурет).



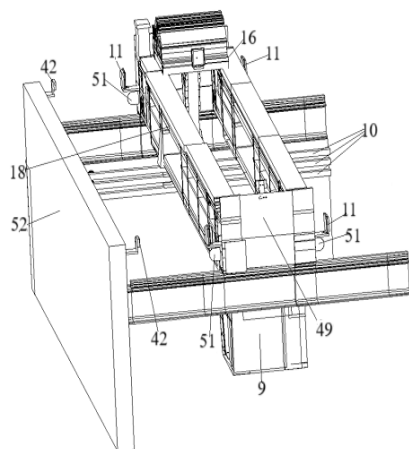
1-сурет – Көпірлі кранды қорғау конструкциясы



2-сурет – Көпірлі кранды қорғаудың функционалдық схемасы



3-сурет – Көпір қранының арбасында қорғаныс конструкциясының орналасуы



4-сурет – Кран көпірінде қорғаныс конструкциясының орналасуы

Экономикалық тиімділігі – қорғаныс конструкция соңғы ажыратқыштарды пайдаланудан бас тартуға мүмкіндік береді, сол арқылы оларды сатып алу мен пайдалануға арналған экономикалық шығындарды болдырмайды.

Қорытынды

Құрамында қымбат дюралюминий бар соңғы ажыратқыштарды, техникалық күмістен жасалған контактілерді және олардың іске қосылуына арналған едәуір салмақ-габариттік параметрлері бар металл шығыңқларды (шаңғыларды) пайдаланудың болмауы электр энергетикасының өзекті

мәселесіне – пайдаланылатын материалдардың ресурстарын үнемдеуге жауап береді. Ұсынылған конструкция көпірлі қранды және оның жүк көтергіш арбасын олардың шекті рұқсат етілген жағдайларының өтуін болдырмау үшін қорғауды іске асыруға мүмкіндік береді. Ресурс үнемдеу геркондар мен тұрақты магниттерді пайдаланудан тұрады, олар өз құны бойынша да, салмақтық және габариттік параметрлері бойынша да металл шығыңқы шеткі ажыратқыштарға қарағанда біршама арзан және аз.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

1 Гуревич В. И. Электрические реле. Устройство, принцип действия и применение. Настольная книга электротехника. Серия: «Компоненты и Технологии». Москва, изд. СОЛОН-Пресс. 688с., 2011. [Elektrich rele Ustr princip deist i primen 2011.pdf](#)

2 Трансформаторы измерительные Часть 2. Технические условия на трансформаторы тока. Москва, изд. «Стандартинформ». 46с., 2018. https://www.elec.ru/viewer?url=files/2019/03/21/pnst_283-2018.pdf

3 Regeli Suassuna de Andrade Ferreira, Jalberth Fernandes de Araujo, Filipe L.M. Andrade, Edson G. Costa, Francisco C.F. Guerra. Influence of electromagnetic forces in the gaps of a protective CT. IET «Science, Measurement & Technology». Vol. 12, Issue 7, P. 872–877, 2018. DOI: – [10.1049/iet-smt.2017.042](#)

4 Issabekov D., Issenov S. Alternative Resource-Saving Current Protections for Electric Motors. Proceedings – 2024 International Russian Smart Industry Conference «SmartIndustryCon 2024», P. 19–24, 2024. DOI: [10.1109/SmartIndustryCon61328.2024.10515681](#)

5 Yafeng Chen, Qi Huang, Arsalan Habib Khawaja. Interference-rejecting current measurement method with tunnel magnetoresistive magnetic sensor array. IET «Science, Measurement & Technology». Vol. 12, Issue 6, P. 733 – 738, 2018. DOI: [10.1049/iet-smt.2017.0433](#)

6 Crescentini M. et al. Hall-effect current sensors: principles of operation and implementation techniques. IEEE «Sensors» journal. Vol. 22, № 11. June 1, P. 10137–10151, 2022. – <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=9568879>

7 Ayob Nazmy Nanyan, Muzamir Isa, Haziah Abdul Hamid, Mohamad Nur Khairul Hafizi Rohani, Baharuddin Ismail. A Review / The Rogowski Coil Sensor in High Current Application. IOP Conf. Series: «Materials Science and Engineering». № 318, P. 1–10, 2018. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/318/1/012054/pdf>

8 **Gurevich V. I.** Device of Protection of Relay Protection: Scientific Journal of «Electrical Engineering». Vol. 3 Iss. 3, P. 52–57, June 2013. https://gurevich-publications.com/articles_pdf/device_protection_rel_prot_engl.pdf

9 **Issabekov D. D.** Resource-saving protections of power transformers against internal faults. «E3S Web of Conferences ICECAE». Vol. 434, № 01041, P. 35–39, 2023. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202343401041>

10 Приказ Министра энергетики Республики Казахстан. Правила устройства электроустановок Республики Казахстан: утв. 20 марта 2015 года, № 230 // adilet.zan.kz. <https://adilet.zan.kz/rus/docs/V1500010851>

REFERENCES

1 **Gurevich V. I.** Jelektricheskie rele. Ustrojstvo, princip dejstvija i primenenie. Nastol'naja kniga jelectrotehnika. Serija: «Komponenty i Tehnologii». [Electric relays. Device, principle of operation and application], [Text]. Moskva: izd. SOLON-Press. 2011.–688 p. [Elektrich_rele_Ustr_princip_deist_i_primen_2011.pdf](#)

2 Transformatory izmeritel'nye. Chast' 2. Tehnicheskie uslovija na transformatory toka. [Measuring transformers], [Text] Moskva: izd. «Standartinform». 2018.–46 P. https://www.elec.ru/viewer?url=files/2019/03/21/pnst_283-2018.pdf

3 **Regelii Suassuna de Andrade Ferreira, Jalberth Fernandes de Araujo, Filipe L.M. Andrade, Edson G. Costa, Francisco C.F. Guerra.** Influence of electromagnetic forces in the gaps of a protective CT. *IET «Science, Measurement & Technology»*, Vol. 12, Iss. 7. 2018.–P. 872–877. DOI: [10.1049/iet-smt.2017.042](https://doi.org/10.1049/iet-smt.2017.042)

4 **Issabekov D., Issenov S.** Alternative Resource-Saving Current Protections for Electric Motors. Proceedings – 2024 International Russian Smart Industry Conference «SmartIndustryCon 2024». 2024. – P. 19–24. DOI: [10.1109/SmartIndustryCon61328.2024.10515681](https://doi.org/10.1109/SmartIndustryCon61328.2024.10515681)

5 **Yafeng Chen, Qi Huang,** Arsalan Habib Khawaja. Interference-rejecting current measurement method with tunnel magnetoresistive magnetic sensor array. *IET «Science, Measurement & Technology»*, Vol. 12, Iss. 6. 2018. – P. 733–738. DOI: [10.1049/iet-smt.2017.0433](https://doi.org/10.1049/iet-smt.2017.0433)

6 **Crescentini M. et al.** Hall-effect current sensors: principles of operation and implementation techniques. IEEE «Sensors» journal, Vol. 22, № 11, June 1, 2022. <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=9568879>

7 Ayob Nazmy Nanyan, Muzamir Isa, Haziah Abdul Hamid, Mohamad Nur Khairul Hafizi Rohani, Baharuddin Ismail. A Review / The Rogowski Coil Sensor in High Current Application. IOP Conf. Series: «Materials Science and Engineering». № 318. 2018. – P. 1–10. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/318/1/012054/pdf>

8 **Gurevich V. I.** Device of Protection of Relay Protection: Scientific Journal of «Electrical Engineering», Vol. 3 Iss. 3. June 2013. – P. 52–57. https://gurevich-publications.com/articles_pdf/device_protection_rel_prot_engl.pdf

9 **Issabekov D. D.** Resource-saving protections of power transformers against internal faults. «E3S Web of Conferences, ICECAE». Vol. 434, № 01041. 2023. – P. 35–39. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202343401041>

10 Prikaz Ministra jenergetiki Respubliki Kazahstan. Pravila ustrojstva jelektroustanovok Respubliki Kazahstan [Rules for Electrical Installations of the Republic of Kazakhstan], [Text]: utv. 20 marta 2015 goda, № 230 // adilet.zan.kz. <https://adilet.zan.kz/rus/docs/V1500010851>

30.06.25 ж. баспаға түсті.

15.07.25 ж. түзетулерімен түсті.

05.09.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

Д. Д. Исабеков

Торайғыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар

Поступило в редакцию 30.06.25

Поступило с исправлениями 15.07.25

Принято в печать 05.09.25

РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩАЯ КОНСТРУКЦИЯ ДЛЯ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК, НАПРЯЖЕНИЕМ ДО 1000 В

В статье автор предлагает ресурсосберегающую конструкцию, разработанную для грузоподъемных механизмов (ГПМ), в частности для мостового крана, которая является альтернативой традиционным конечным выключателям. Разработка ресурсосберегающих устройств и конструкций для электроустановок от повреждений началось в середине прошлого века и остается актуальным и сегодня. Подъемно-транспортные машины (ПТМ) широко распространены в различных отраслях народного хозяйства, в том числе в промышленности, строительстве, транспорте, горнодобывающей, металлургической, машиностроительной отраслях, как наиболее эффективное средство для погрузочно-разгрузочных и строительно-монтажных работ при механизации и автоматизации производства. Во всех этих отраслях используется множество видов подъемно-транспортных машин общего пользования. Они характеризуются особенностями типов и общих свойств перевозимых грузов, а также принимаются в зависимости от траектории и геометрической формы перевозимых грузов в любой отрасли производства.

Применение таких машин облегчает тяжелую ручную работу, позволяет повысить производительность труда. Научная новизна работы заключается в дальнейшем развитии теории построения конструкций на герконах. Указывается, что полностью выполняется реализация альтернативной конструкции, выполняющей операции контроля перемещения ее элементов, исходя из индукции магнитных полей в точках мостового крана и в различных его режимах работы. В такой конструкции концевые выключатели не используются, а вместо них используется геркон. Он действует в роли датчика тока и измерительного устройства одновременно, срабатывая от магнитного поля, создаваемое постоянным магнитом. Для восприятия магнитного поля геркон устанавливается ближе к постоянному магниту с соблюдением минимально допустимого расстояния. Целью исследования является разработка новой ресурсосберегающей защиты, выполненной на герконе, которая может применяться на примере мостового крана и к другим грузоподъемным механизмам.

Ключевые слова: мостовой кран, тележка, геркон, индукция, ресурсосбережение.

D. D. Issabekov

Toraighyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar

Received 30.06.25

Received in revised form 15.07.25

Accepted for publication 05.09.25

Received 30.06.25

Received in revised form 15.07.25

Accepted for publication 05.09.25

RESOURCE-SAVING CONSTRUCTION FOR ELECTRICAL INSTALLATIONS WITH VOLTAGES UP TO 1000 V

In the article the author proposes a resource-saving construction developed for load-lifting machinery (LLM), in particular for an overhead crane, which is an alternative to traditional limit switches. The development of resource-saving devices and constructions for electrical installations from damage began in the middle of the last century and remains relevant today. Lifting and transporting machines (LTM) are widely used in various sectors of the national economy, including industry, construction, transport, mining, metallurgy, engineering, as the most effective means for loading and unloading and construction and installation works during mechanization

and automation of production. In all these industries, many types of general lifting and transporting machines are used. They are characterized by peculiarities of types and general properties of transported cargoes, and are adopted depending on the trajectory and geometric shape of transported cargoes in any branch of production. The use of such machines facilitates heavy manual work, allows to increase labor productivity. The scientific novelty of the work consists in further development of the theory of construction on reed switches. It is pointed out that the realization of an alternative construction, which performs the operations of controlling the movement of its elements, based on the induction of magnetic fields at the points of the overhead crane and in its various modes of operation, is fully performed. In this construction limit switches are not used, and instead of them uses a reed switch. It acts as a current sensor and measuring device at the same time, triggered by the magnetic field generated by the permanent magnet. To sense the magnetic field, the reed switch is placed closer to the permanent magnet, observing the minimum permissible distance. The purpose of the study is to develop a new resource-saving protection made on a reed switch, which can be applied to the example of an overhead crane and other hoisting mechanisms.

Keywords: overhead crane, cart, reed switch, induction, resource saving.

<https://doi.org/10.48081/HBCD6361>

А. Е. Карманов¹, *Н. Ә. Уахит², А. М. Парамонов³

^{1,2}Торайғыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар,

³Омский Государственный Технический университет,

Российская Федерация, г. Омск

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7512-0275>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1626-2895>

³ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-9271-2744>

e-mail: nauryzmc@gmail.com

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ УДЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРОКАЛЕННОГО НЕФТЯНОГО КОКСА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

Прокалка нефтяного кокса является ключевым процессом для формирования его товарных свойств, необходимых в алюминиевой промышленности, где удельное электрическое сопротивление (УЭС) существенно влияет на эффективность производства. Цель исследования заключалась в разработке метода прогнозирования УЭС прокаленного нефтяного кокса с использованием искусственного интеллекта для оптимизации режима работы печи и повышения качества продукции. В работе применялись лабораторные испытания в муфельной печи при температурах 900–1300 °С с измерением УЭС, а также методы машинного обучения, реализованные в языке программирования Python. Для обучения модели глубоких нейронных сетей использовались производственные данные. Установлена обратная зависимость УЭС от температуры прокалики: минимальное значение УЭС (459 мкОм·м) достигнуто при 1380 °С, что связано с графитизацией структуры кокса. Разработанная модель продемонстрировала потенциал для прогнозирования УЭС с метриками качества $R^2 = 0,152$ и $MAE = 10,729$ мкОм·м. Исследование подтвердило возможность применения искусственного интеллекта для контроля качества кокса, что способствует снижению энергозатрат и брака. Научная новизна работы заключается в

адаптации глубоких нейронных сетей к задаче прогнозирования УЭС нефтяного кокса, а практическая значимость – в возможности интеграции модели в системы управления печами для оперативной корректировки технологического процесса.

Ключевые слова: нефтяной кокс, удельное электрическое сопротивление, искусственный интеллект, глубокие нейронные сети, машинное обучение.

Введение

Нефтяной кокс – это общее обозначение твердых продуктов глубокой переработки нефти, преимущественно состоящих из углерода [1]. Он служит основным сырьем для изготовления анодов в алюминиевой промышленности, где его свойства, такие как удельное электрическое сопротивление (УЭС) и истинная плотность, существенно влияют на эффективность электролитического производства первичного алюминия [2]. Качество прокаленного нефтяного кокса в значительной степени определяется характеристиками исходной нефти, поступающей на нефтеперерабатывающие заводы, а также условиями получения сырого кокса на установках замедленного коксования [3]. Такие немаловажные показатели как содержание серы и других примесей, что являются химическими параметрами продукции. Действительная плотность и удельное электросопротивление, являющиеся физическими параметрами готовой продукции, подлежат управлению посредством соблюдения технологического режима процесса прокалики кокса. Прокалка нефтяного кокса при температурах 1100–1400 °С удаляет влагу и летучие вещества, уплотняет структуру и повышает электропроводность нефтяного кокса [4].

Качество нефтяного кокса существенно влияет на технологию, экологические аспекты и экономическую эффективность производства алюминия. С позиции алюминиевых производителей, кокс должен характеризоваться минимальной зольностью, отсутствием каталитических примесей, высокой устойчивостью к воздействию кислорода и CO₂, низкой пористостью и удельным электрическим сопротивлением, достаточной механической прочностью для обработки и оптимальной микроструктурой [4].

Типовой элементный состав зеленого (сырого) нефтяного кокса представлен в таблице 1, предлагаемого в качестве компонента электрода [5].

Таблица 1 – Элементный состав сырого нефтяного кокса

№	Элемент	Доля, %
1	Углерод, С	91–99,5
2	Водород, Н	0,035–4

3	Сера, S	0,5–8
4	Азот и Кислород, N + O	1,3–3,8
5	Металлы	Остаток

Нефтяной кокс характеризуется уникальным сочетанием физико-химических и физико-механических свойств, что обеспечивает его широкое использование в различных отраслях промышленности. Ключевыми свойствами являются термическая и химическая устойчивость в агрессивных средах, низкий коэффициент линейного расширения, высокая механическая прочность, хорошая тепло- и электропроводность, а также приемлемые упругопластические характеристики. Для достижения этих свойств кокс подвергается термической обработке при температурах не ниже 650–750 °С, при этом отдельные свойства проявляются только после графитирования при 2600–3000 °С. Прокаленный кокс активно применяется в цветной и черной металлургии [5].

Нефтяной кокс обладает редким сочетанием физико-химических и физико-механических свойств, благодаря которым он получил широкое применение во многих отраслях промышленности.

К таким свойствам относятся термическая и химическая стойкость в агрессивных средах, сравнительно низкий коэффициент линейного расширения, достаточно высокая механическая прочность, высокая теплопроводность и электрическая проводимость, удовлетворительные упругопластические характеристики и др. Для приобретения этих свойств кокс должен пройти термическую обработку при температурах не ниже 650–750 °С, а некоторые свойства достигаются только после графитирования кокса при температурах 2600–3000 °С. Цветная и черная металлургия в своих производствах применяют прокаленный кокс [5].

Прокалка кокса – сложный физико-химический процесс, проходящий под действием высоких температур и сопровождаемый параллельными и последовательными процессами разложения и уплотнения сырого нефтяного кокса [6]. В ходе прокалки происходит деструктивное разложение материала с образованием кокса и обеднение водородом, который в виде метана и других углеводородов, выделяется в топочное пространство, с последующим сгоранием. При этом, весь процесс сопровождается изменением структуры и плотности кокса. Вследствие прокалки кокса, повышается удельное сопротивление и механическая прочность материала, увеличивается кажущаяся и действительная плотность, происходит полное удаление влаги и летучих веществ. Основными факторами, влияющими на качество готового продукта и полноту протекания процесса, являются температура в зоне прокалки и время нахождения кокса в печи.

Процесс прокалки, обусловленный вариациями состава сырья и высокими энергозатратами, требует новых подходов к управлению. В данной работе предложен метод прогнозирования удельного электрического сопротивления прокаленного нефтяного кокса с применением инструментов искусственного интеллекта.

Искусственный интеллект, в частности глубокие нейронные сети, успешно применяется для моделирования сложных технологических процессов, таких как прокалка цемента [7; 8], но исследования в области нефтяного кокса ограничены. Целью данной работы является разработка алгоритма для прогнозирования УЭС прокаленного кокса, что позволит оптимизировать режим работы печи и повысить качество продукции.

Материалы и методы

Нефтяной кокс, получаемый при переработке тяжелых нефтяных остатков, обладает разнообразной дисперсной структурой и свойствами, которые зависят от природы и химического состава исходной нефти, технологий ее переработки, а также от химического состава и метода коксования остатков. Для обеспечения максимальной эффективности процесса прокалки кокса необходимо анализировать формирование его свойств на всех этапах – от нефтепереработки до хранения сырья для анодного производства, с учетом передового опыта мировой алюминиевой промышленности.

Объект исследования – нефтяной кокс, представляющий собой хрупкую ноздреватую массу с содержанием углерода 90–97 %, водорода 1,5–8 % и примесями (сера, азот, металлы). Сырой кокс подвергался прокалке в лабораторных условиях в муфельной печи (Рисунок 1).



Рисунок 1 – Муфельная печь для прокалки нефтяного кокса

УЭС измерялось согласно стандарту СТ РК ISO 10142-2018 [9] с использованием прибора для измерения сопротивления ALC-25 (Рисунок 2). Данное оборудование использует микропроцессор в качестве управляющего центра для определения удельного электрического сопротивления частиц прокаленного нефтяного кокса, предназначенного для производства алюминия. Устройство оснащено интерфейсом и сенсорным экраном, что обеспечивает удобство управления и точность измерений.



Рисунок 2 – Измеритель удельного сопротивления ALC-25

Высушенную пробу измельчают до размера частиц более 1,4 мм в дробилке. Для проведения из испытания пробу засыпают в цилиндрический стакан со съёмным дном, собранный стакан помещают в испытательную машину.

Прокалка проводилась в диапазоне температур 900–1300 °С для определения зависимости УЭС от температуры. Пробы помещались в цилиндрический стакан, подвергались давлению 3 МПа, и измерялось падение напряжения для расчета УЭС по формуле (1):

$$\rho = \frac{S \times U}{I \times h} \quad (1)$$

где S – площадь матрицы, мм²;

U – падение напряжения, мВ;

I – сила тока, А, в усилителях (1,000±0,002) А;

h – высота столбика кокса, мм.

Данные расчеты прибор проводит автоматически. За результат испытания принимают среднее арифметическое из двух испытаний.

В современных условиях все большее значение приобретает применение методов искусственного интеллекта для моделирования и оптимизации технологического процесса. Искусственный интеллект – это способность машин или компьютерных систем выполнять задачи, требующие человеческого интеллекта, такие как анализ данных, обучение на опыте и принятие обоснованных решений [10].

На сегодняшний день в литературе имеется малое количество исследований в области прогнозирования качественных показателей прокаленного нефтяного кокса. Было проведено несколько научных исследований по моделированию процесса прокаливания. Однако большинство из них рассматривают моделирование процесса прокаливания при производстве цемента [11; 12]. В данных работах для моделирования процесса прокаливания использовались исторические данные технологических параметров завода по производству цемента, которые регистрируются ежедневно с помощью автоматизированной системы мониторинга и контроля. К этим параметрам относятся скорость вращения печи прокали, температуры в нескольких точках процесса прокали, скорость вращения вентилатора, давление воздуха и т. д.

В настоящей работе удельное электрическое сопротивление прокаленного нефтяного кокса прогнозируется с использованием методов машинного обучения. В качестве входных данных для обучения модели используются исторические данные завода по прокалике кокса. Входные данные содержат эксплуатационные характеристики, такие как температуры в нескольких точках печи прокали, скорость вращения печи, потребление топлива и т. д.

Рабочий процесс предлагаемой методики по прогнозированию удельного электрического сопротивления представлен на рисунке 3.



Рисунок 3 – Рабочий процесс предлагаемого метода

Архитектура глубокой нейронной сети создается путем соединения ряда слоев, где каждый слой состоит из группы единиц (нейронов), соединенных друг с другом, как показано на рисунке 4. В архитектуре глубоких нейронных

сетей (ГНС) входной слой является начальным слоем, который получает необработанные данные, которые могут состоять из аудио или изображений. С другой стороны, выходной слой является конечным слоем, который представляет выведенные классы. Остальные слои являются скрытыми слоями, которые преобразуют входные значения в выведенные классы.

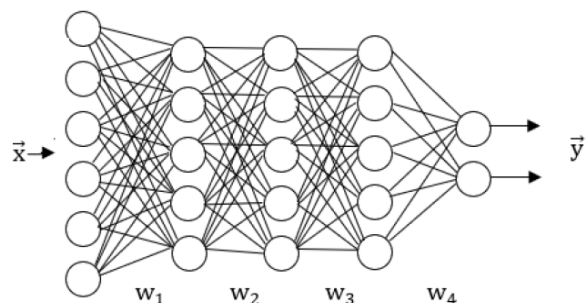


Рисунок 4 – Архитектура глубокой нейронной сети

На рисунке 4 изображена нейронная сеть прямого распространения, которая состоит из входного слоя, двух скрытых слоев и одного выходного слоя, при котором данные последовательно проходят через слои сети в одном направлении – от входного слоя через скрытые слои к выходному. Каждый слой в сети соединен со следующим через матрицу весов, что приводит к четырем матрицам весов: W_1 , W_2 , W_3 и W_4 . Когда предоставляется входной вектор x , первая матрица весов w_1 используется для вычисления скалярного произведения, а к результату применяется функция активации. Тот же процесс повторяется для получения конечного результата y , который служит предсказанием сетей [13]. Полный процесс выражается через последующие уравнения, в которых f обозначает функцию активации. Каждый нейрон выполняет линейное преобразование для получения взвешенной суммы входных данных и добавления смещения. Математически это можно представить следующим образом, по формуле (2) [14]:

$$y = f(z) = f(w_1x_1 + w_2x_2 + \dots + w_nx_n + b) \quad (2)$$

где:

y – выход нейрона

$f(z)$ – активационная функция (передаточная функция)

w – вес связей

x – входные признаки

b – смещение

w – вес связей соответствуют параметрам, которые моделируют зависимости между входными признаками (например, температурой, давлением и т. д.) и целевой переменной (электрическим сопротивлением) в производственном процессе.

x – переменная содержит входные данные, которые являются параметрами производственного процесса.

b – смещение добавляется к соответствующему нейрону на слое после применения функции активации. Это смещение обеспечивает гибкость и позволяет сети учитывать различные смещения в данных.

$f(z)$ – активационная функция (передаточная функция) в нейронных сетях играет ключевую роль в добавлении нелинейности к выходу каждого нейрона. Она применяется после линейной комбинации взвешенных входов (суммы произведений весов на входные данные) и смещения.

В целях машинного обучения модели было использовано 80 % имеющихся данных технологического режима. Для оценки производительности обученной модели было предоставлено 20 % набора данных. Оценка производительности модели проводится с использованием стандартных метрик регрессии, таких как коэффициент детерминации и среднеквадратическая ошибка, что позволяет оценить качество прогнозов и адекватность модели [15].

Коэффициент детерминации и средняя абсолютная ошибка определяются по нижеуказанным формулам (3), (4):

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (3)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |y_i - \bar{y}_i|}{n} \quad (4)$$

где:

R^2 – коэффициент детерминации

MAE – средняя абсолютная ошибка

n – количество экспериментов

y_i – фактическое значение электросопротивления

$\bar{y}_i$ – спрогнозированное значение электросопротивления

$\hat{y}_i$ – среднее из спрогнозированных значений

Результаты и обсуждение

На рисунке 4 представлена зависимость удельного электрического сопротивления от температуры прокаливания согласно результатам лабораторного опыта.

Лабораторные испытания показали отчётливую обратную зависимость между температурой проковки и величиной удельного электрического сопротивления. При повышении температуры наблюдается интенсивное снижение УЭС. Минимальное значение УЭС было зафиксировано при температуре 1380 °С и составило 459 мкОм·м, что свидетельствует о высокой степени упорядоченности углеродной структуры.

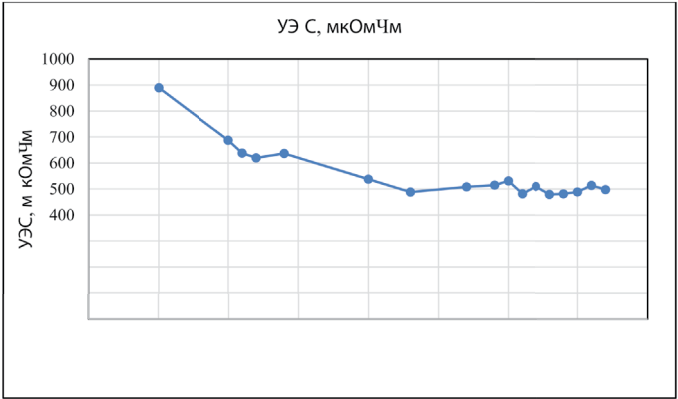


Рисунок 4 – Зависимость удельного электрического сопротивления от температуры прокаливания

В целях подтверждения результатов лабораторного опыта, его значения были сравнены с теоретическими данными, рассчитанными по модели радиационного теплообмена согласно источнику [16]. Электропроводность углеродных материалов при высоких температурах зависит от степени графитизации, которая усиливается за счет радиационного теплообмена. УЭС (моделируется как функция температуры (Т) с учетом изменения структуры кокса, по формуле (5):

$$\rho(T) = \rho_0 \cdot \exp\left(\frac{E_a}{(k \cdot T)}\right)$$
 (5)

где:
ρ (Т) – удельное электрическое сопротивление при температуре Т, мкОм·м
ρ₀– базовое УЭС (1000 мкОм·м)
E_a – энергия активации (0,2 эВ)
k – постоянная Больцмана (8,617·10-5 эВ/К)

Т – абсолютная температура, К

Процентное отклонение рассчитывается по формуле (6):

$$\text{Отклонение } (\%) = \frac{|\rho_{\text{лаб}} - \rho_{\text{теор}}|}{\rho_{\text{теор}}} \cdot 100$$
 (6)

где:
ρ_{лаб} – лабораторное УЭС, мкОм·м
ρ_{теор} – теоретическое УЭС, мкОм·м

Результаты расчетов и сравнение их с лабораторными данными приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Сравнение лабораторных и теоретических значений УЭС

Температура, °С	Лабораторное УЭС, мкОм·м	Теоретическое УЭС, мкОм·м	Отклонение, %
900	890	950	6,3
1100	650	700	7,1
1300	480	500	4,0
1380	459	480	4,4

Сравнение лабораторных данных зависимости УЭС от температуры с теоретическими значениями приведены на рисунке 5.

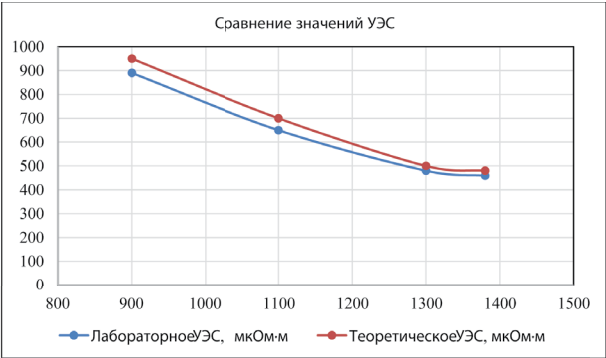


Рисунок 5 – Сравнение лабораторных и теоретических значений УЭС

Как видно из таблицы 2, отклонения составляют 4,0–7,1% от теоретических значений. Эти результаты подтверждают высокую точность

лабораторных измерений УЭС, особенно при температурах выше 1300 °С, где графитизация кокса достигает максимума.

Таким образом, проведённый анализ подтверждает, что повышение температуры прокалики способствует улучшению электропроводности кокса, что связано с повышением степени графитизации. Полученные данные могут быть использованы при оптимизации температурного режима термообработки нефтяного кокса в целях получения продукта с заданными электрическими характеристиками.

На рисунке 6 представлена производительность модели на основе искусственного интеллекта, а именно глубоких нейронных сетей. Синими точками обозначены фактические значения удельного электрического сопротивления (УЭС), оранжевыми точками – прогнозные значения, полученные с помощью ГНС.

После обучения модель была протестирована на независимой тестовой выборке, и для оценки ее качества рассчитаны основные метрики. Использовались следующие показатели:

Средняя абсолютная ошибка (MAE) характеризует среднее отклонение предсказанных значений от фактических. Для ГНС получено значение MAE = 10,729 мкОм·м.

Коэффициент детерминации (R^2) отражает, насколько хорошо модель объясняет вариацию целевой переменной. Для ГНС значение $R^2 = 0,152$.

Для сравнения была применена модель линейной регрессии. Результат модели приведен на рисунке 7, которая показала MAE = 11,706 мкОм·м и $R^2 = 0,099$. Эти результаты демонстрируют превосходство ГНС: более низкое значение MAE указывает на меньшую ошибку прогнозирования, а более высокий R^2 свидетельствует о лучшей способности модели объяснять зависимость УЭС от температуры прокалики. Преимущество ГНС заключается в ее способности улавливать сложные нелинейные зависимости, что подтверждается расчетным обоснованием: снижение MAE на 8,3 % (с 11,706 до 10,729 мкОм·м) и рост R^2 на 53,5 % (с 0,099 до 0,152) по сравнению с линейной регрессией. Это делает ГНС более универсальной для моделирования процессов прокалики в различных производственных условиях, где линейные модели недостаточно точны из-за нелинейного характера зависимости УЭС от температуры.

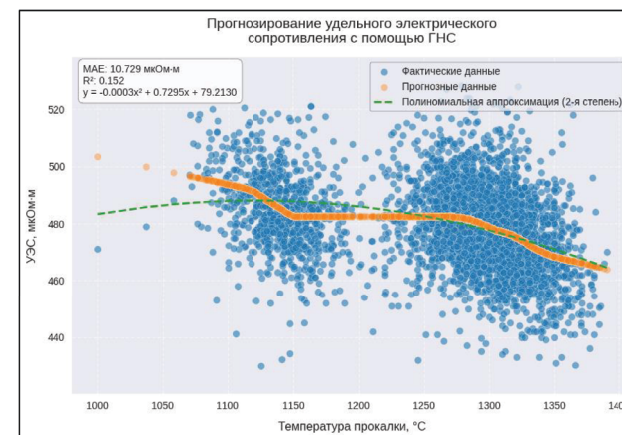


Рисунок 6 – Прогнозирование удельного электрического сопротивления с применением глубоких нейронных сетей

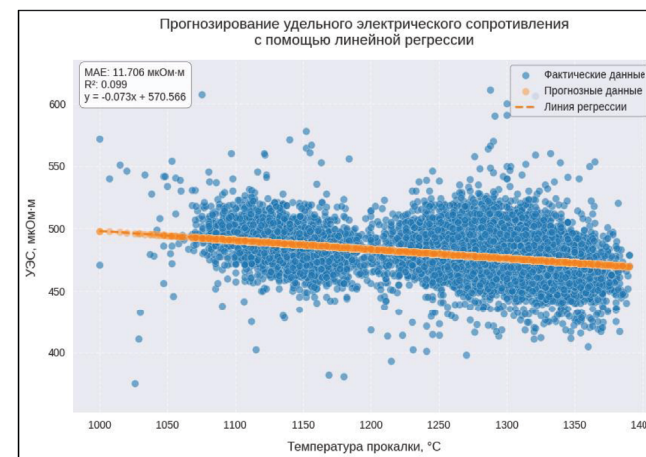


Рисунок 7 – Прогнозирование удельного электрического сопротивления с применением линейной регрессии

Полученные результаты согласуются с исследованиями [11; 12], где ГНС эффективно моделировали процессы прокалики цемента, демонстрируя высокую адаптивность к сложным зависимостям. Практическая значимость работы заключается в возможности интеграции модели ГНС в системы управления печами, что позволит оперативно корректировать режимы

прокалки, минимизировать брак и снизить энергозатраты, обеспечивая более точное соответствие целевым значениям УЭС.

Выводы

Процесс прокалки нефтяного кокса в температурном диапазоне 1000–1400 °С способствует снижению удельного электрического сопротивления (УЭС) с 890 до 459 мкОм·м, обусловленному удалением летучих веществ и графитизацией углеродной структуры материала. Данные изменения имеют ключевое значение для обеспечения требуемых характеристик анодов, используемых в электролитическом производстве алюминия, что напрямую влияет на энергоэффективность и качество конечной продукции.

Применение методов искусственного интеллекта, в частности глубоких нейронных сетей (ГНС), представляет собой инновационный подход к оптимизации процесса прокалки. Разработанная модель демонстрирует удовлетворительные результаты прогнозирования УЭС с метриками $R^2 = 0,152$ и $MAE = 10,729$ мкОм·м, что свидетельствует о её способности адекватно улавливать нелинейные зависимости между температурой и электропроводностью. Сравнительный анализ с моделью линейной регрессии ($R^2 = 0,099$, $MAE = 11,706$ мкОм·м) подтверждает превосходство ГНС в условиях сложной зависимости параметров, что делает её перспективной для применения в реальном времени управления технологическими процессами.

Научная новизна настоящего исследования заключается в адаптации архитектуры глубоких нейронных сетей к задаче прогнозирования УЭС нефтяного кокса, что представляет собой недостаточно изученную область. Практическая значимость работы обусловлена потенциалом интеграции предложенной модели в системы автоматизированного управления печами, что позволяет корректировать температурные режимы в режиме реального времени, снижая энергозатраты и уменьшая долю дефектной продукции.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 **Sharikov, F. Y., Sharikov, Y. V. and Krylov, K. A.** Selection of key parameters for green coke calcination in a tubular rotary kiln to produce anode petcoke. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. – 2020. – 15(23). – P. 2904–2912.
- 2 **Edwards, L.** The history and future challenges of calcined petroleum coke production and use in aluminum smelting. *Jom*. – 2015. – 67(2), – P. 308–321.
- 3 **Rohani, A., Sharifi, K. and Golpasha, R.** Calcinations of Petroleum coke. In *Proceedings of 3rd International Conference on Chemical, Ecology and Environmental Sciences*. – 2014. – P. 118–120.

- 4 **Martins, M. A., Oliveira, L. S. and Franca, A. S.** Modeling and simulation of petroleum coke calcination in rotary kilns. *Fuel*. – 2001. – 80(11). – P. 1611–1622.
- 5 **Birghila, S., Popovici, I. C. and Dumitru, A.** Study on physical-chemical properties of petroleum cokes. *Romanian Journal of Physics*. – 2011. – 56 (7-8). – P. 976–82.
- 6 **Peng, J., Hui, C., Zhao, Z. and Fang, Y.** Research and optimization of operating parameters of a rotor classifier for calcined petroleum coke. *Processes*. – 2024. – 12(3). – P. 603.
- 7 **Ali, A.M., Tabares, J.D. and McGinley, M.W.** A machine learning approach for clinker quality prediction and nonlinear model predictive control design for a rotary cement kiln. *Journal of Advanced Manufacturing and Processing*. – 2022. – 4(4). – P. 10137.
- 8 **Xu, Q., Hao, X., Shi, X., Zhang, Z., Sun, Q. and Di, Y.** Control of denitration system in cement calcination process: A Novel method of Deep Neural Network Model Predictive Control. *Journal of Cleaner Production*. – 2022. – 332. – P. 129970.
- 9 СТ РК ISO 10142-2018. Метод определения удельного электрического сопротивления прокаленного нефтяного кокса.
- 10 **Tsallis, C., Papageorgas, P., Piromalis, D. and Munteanu, R. A.** Application-Wise Review of Machine Learning-Based Predictive Maintenance: Trends, Challenges, and Future Directions. *Applied Sciences*. – 2025. – 15(9). – P. 48–98.
- 11 **Sharma, P., Rao, M. V. R., Mohapatra, B. N. and Saxena, A.** Development of suitable machine learning model for a cement plant calciner. *Int. J. Eng. Appl. Sci. Technol.* – 2021. – 6. – P. 194–198.
- 12 **Kahawalage, A.C. and Jinadasa, W.** Modelling a Cement Precalciner by Machine Learning Methods. *Scandinavian Simulation Society*. – 2022. – P. 99–106.
- 13 **Saravanan, K. and Kouzani, A. Z.** Advancements in on-device deep neural networks. *Information*. – 2023. – 14(8). – P. 470.
- 14 **Thierry-Mieg, J.** How the fundamental concepts of mathematics and physics explain deep learning. – 2018.
- 15 **Li, L., Gao, Y., Dong, X. and Han, Y.** Artificial Neural Network Model for Predicting Mechanical Strengths of Economical Ultra-High-Performance Concrete Containing Coarse Aggregates: Development and Parametric Analysis. *Materials*. – 2024. – 17 (16). P. 3908.
- 16 **Modest, M. F., & Mazumder, S.** Radiative heat transfer. *Academic P.* – 2021.

REFERENCES

1 **Sharikov, F. Y., Sharikov, Y. V. and Krylov, K. A.** Selection of key parameters for green coke calcination in a tubular rotary kiln to produce anode petcoke. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2020. – 15 (23). – P. 2904–2912.

2 **Edwards, L.** The history and future challenges of calcined petroleum coke production and use in aluminum smelting. Jom. – 2015. – 67 (2). – P. 308–321.

3 **Rohani, A., Sharifi, K. and Golpasha, R.** Calcinations of Petroleum coke. In Proceedings of 3rd International Conference on Chemical, Ecology and Environmental Sciences. – 2014. – P. 118–120.

4 **Martins, M. A., Oliveira, L.S. and Franca, A. S.** Modeling and simulation of petroleum coke calcination in rotary kilns. Fuel. – 2001. – 80(11). – P. 1611–1622.

5 **Birghila, S., Popovici, I. C. and Dumitru, A.** Study on physical-chemical properties of petroleum cokes. Romanian Journal of Physics. – 2011. – 56(7-8). – P. 976–82.

6 **Peng, J., Hui, C., Zhao, Z. and Fang, Y.** Research and optimization of operating parameters of a rotor classifier for calcined petroleum coke. Processes. – 2024. – 12(3). – P. 603.

7 **Ali, A. M., Tabares, J. D. and McGinley, M. W.** A machine learning approach for clinker quality prediction and nonlinear model predictive control design for a rotary cement kiln. Journal of Advanced Manufacturing and Processing. – 2022. – 4 (4). – P. 10137.

8 **Xu, Q., Hao, X., Shi, X., Zhang, Z., Sun, Q. and Di, Y.** Control of denitration system in cement calcination process: A Novel method of Deep Neural Network Model Predictive Control. Journal of Cleaner Production. – 2022. – 332. – P. 129970.

9 ST RK ISO 10142-2018. Metod opredeleniya udel'nogo elektricheskogo soprotivleniya prokalennogo nefryanogo koksa [Method for determining the specific electrical resistance of calcined petroleum coke].

10 **Tsallis, C., Papageorgas, P., Piromalis, D. and Munteanu, R.A.** Application-Wise Review of Machine Learning-Based Predictive Maintenance: Trends, Challenges, and Future Directions. Applied Sciences. – 2025. – 15 (9). – P. 4898.

11 **Sharma, P., Rao, M.V. R., Mohapatra, B.N. and Saxena, A.** Development of suitable machine learning model for a cement plant calciner. Int. J. Eng. Appl. Sci. Technol. – 2021. – 6. – P. 194–198.

12 **Kahawalage, A.C. and Jinadasa, W.** Modelling a Cement Precalciner by Machine Learning Methods. Scandinavian Simulation Society. – 2022. – P. 99–106.

13 **Saravanan, K. and Kouzani, A. Z.** Advancements in on-device deep neural networks. Information. – 2023. – 14(8). – P. 470.

14 **Thierry-Mieg, J.** How the fundamental concepts of mathematics and physics explain deep learning. – 2018.

15 **Li, L., Gao, Y., Dong, X. and Han, Y.** Artificial Neural Network Model for Predicting Mechanical Strengths of Economical Ultra-High-Performance Concrete Containing Coarse Aggregates: Development and Parametric Analysis. Materials. – 2024. – 17(16). P. 3908.

16 **Modest, M. F., & Mazumder, S.** Radiative heat transfer. Academic press. – 2021.

Поступило в редакцию 04.07.25

Поступило с исправлениями 28.07.25

Принято в печать 05.09.25

*А. Е. Карманов¹, *Н. Ә. Уахит², А. М. Парамонов³*

^{1,2}Торайғыров университеті, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.,

³Омбы мемлекеттік техникалық университеті,

Ресей Федерациясы, Омбы қ.,

04.07.25 ж. баспаға түсті.

28.07.25 ж. түзетулерімен түсті.

05.09.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

МҰНАЙ КОКСЫНЫҢ КҮЙДІРІЛГЕН КЕЗДЕГІ МЕНШІКТІ ЭЛЕКТР КЕДЕРГІСІН ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ АРҚЫЛЫ БОЛЖАУ

Мұнай коксін күйдіру алюминий өнеркәсібі үшін қажетті тауарлық қасиеттерін қалыптастырудың негізгі процесі болып табылады, мұнда меншікті электр кедергісі (МЭК) өндіріс тиімділігіне айтарлықтай әсер етеді. Зерттеудің мақсаты пештің жұмыс режимін оңтайландыру және өнім сапасын жақсарту үшін жасанды интеллектті қолдана отырып, күйдірілген мұнай коксының МЭК-ін болжау әдісін әзірлеу болды. Зерттеуде 900–1300 °C температурада мұфельді пеште МЭК өлшеумен зертханалық сынақтар, сондай-ақ Python бағдарламалау тілінде жүзеге асырылған машинамен оқыту әдістері қолданылды. Терең нейрондық желілер моделін оқыту үшін өндірістік деректер пайдаланылды. МЭК-тің күйдіру температурасына кері тәуелділігі анықталды: ең төменгі МЭК мәні (459 мкОм·м) 1380 °C температурада қол жеткізілді, бұл кокс құрылымының графиттенуімен байланысты. Өзірілген модель $R^2 = 0,152$ және $MAE = 10,729$ мкОм·м сапа метрикаларымен МЭК-ті болжау әлуетін көрсетті. Зерттеу кокс сапасын бақылау үшін жасанды интеллектті қолдану мүмкіндігін растады, бұл энергия шығынын және ақауларды азайтуға ықпал етеді. Жұмыстың

ғылыми жаңалығы мұнай коксының МЭК-ін болжау міндетіне терең нейрондық желілерді бейімдеуде жатыр, ал практикалық маңыздылығы технологиялық процесті жедел түзету үшін нештерді басқару жүйелеріне модельді біріктіру мүмкіндігінде..

Кілтті сөздер: Мұнай коксы, меншікті электр кедергісі, жасанды интеллект, терең нейрондық желілер, машиналық оқыту.

A. E. Karmanov¹, *N. A. Uakhi², A. M. Paramonov³

^{1,2}Toraighyrov University, Pavlodar, Republic of Kazakhstan

³Omsk State Technical University, Omsk, Russian Federation

Received 04.07.25

Received in revised form 28.07.25

Accepted for publication 05.09.25

PREDICTION OF SPECIFIC ELECTRICAL RESISTANCE OF CALCINED PETROLEUM COKE USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE

Calcination of petroleum coke is a key process for forming its commercial properties, which are essential for the aluminum industry, where specific electrical resistivity (SER) significantly impacts production efficiency. The aim of the study was to develop a method for predicting the SER of calcined petroleum coke using artificial intelligence to optimize furnace operation and improve product quality. The study involved laboratory tests in a muffle furnace at temperatures of 900–1300 °C with SER measurements, as well as machine learning techniques implemented in the Python programming language. Production data were used to train a deep neural network model. An inverse relationship was established between SER and calcination temperature: the minimum SER value (459 $\text{m}\Omega \cdot \text{m}$) was achieved at 1380 °C, attributed to the graphitization of the coke structure. The developed model demonstrated potential for SER prediction with quality metrics of $R^2 = 0,152$ and $\text{MAE} = 10,729 \text{ m}\Omega \cdot \text{m}$. The study confirmed the feasibility of using artificial intelligence for coke quality control, contributing to reduced energy consumption and defects. The scientific novelty of the work lies in the adaptation of deep neural networks to the task of predicting the SER of petroleum coke, while its practical significance is in the potential integration of the model into furnace control systems for real-time process adjustments.

Keywords: Petroleum coke, specific electrical resistance, artificial intelligence, deep neural networks, machine learning.

FTAMP 44.01.01

<https://doi.org/10.48081/VGSO8297>

**Ы. С. Кустаулетов¹, Н. М. Танырберген²,
О. М. Талипов³, Т. М. Жакупов⁴**

^{1,2}Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті
Қазақстан Республикасы, Өскемен қ.

³Торайғыров университеті, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.;

⁴«Green Thermal Energy» ЖШС, Павлодар қ.

¹ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-7554-759X>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6354-5428>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8355-1769>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9725-0262>

ШЕТЕЛДЕ ЖӘНЕ ҚАЗАҚСТАНДА ҚАМЫСТАН, МЫСЫҚҚҰЙРЫҚТАН ЭНЕРГИЯ АЛУДЫ ЗЕРТТЕУ

Биомассаның әлемдік энергия балансына қосқан үлесі 10-15%-ға бағаланып, әсіресе елдерде 23%-ға жетеді (Финляндия). Жердегі биомассаның жылдық өсімі 220 млрд. тоннаны құрайды. Бұл мақалада аралас отын брикеттерін өндіру арқылы қамыс пен мысыққұйрықты пайдалану мүмкіндігі талданады. Ля, Шу, Сырдария, Қаратау және Ақсу өзендерінің төменгі ағысы мен атырауларында, Балқаш көлдерінің жағасында және басқаларында, сондай-ақ сулы-батпақты жерлерде қамыс және мысыққұйрықтың ірі массивтері орналасқан. Мұның бәрі ыстық уақытта қатты өртке әкеледі. Қамыс және мысыққұйрық - бұл ауылшаруашылық жерлерінің учаскелері, суару каналдарының төсектері және т. б. д., гидрофитті арамиоптермен бітелу, оларды әртүрлі тәсілдермен, соның ішінде химиялық жолмен бақылау керек. Бұл өсімдіктер өте жоғары көміртегімен сипатталады. Осыған байланысты ауыл шаруашылығы қалдықтарын тауарлық өнімге қайта өңдейтін шағын және орта кәсіпорындарды дамыту өзекті болып отыр. Мақалада сабан қосылған қамыс сияқты ауылшаруашылық қалдықтарынан жасалған отын брикеттерінің энергетикалық сипаттамалары талданады. Әдебиеттерге шолу жасалды, сондай-ақ Қазақстан Республикасы Ақмола облысының қамыс алқаптарының әуе, гарыштық бейнелерін декодтау жүргізілді, оның талдауынан таңдалған мәселе бойынша зерттеулер жүргізудің

орындылығы анықталды, бұл ауыл шаруашылығында қамыс брикеттерін пайдаланудың артықшылықтарына байланысты.

Кілтті сөздер: жылу энергиясы, отын брикеті, қамыс, мысыққұйрық, ауылшаруашылық қалдықтары, қалдықтарды жою, брикеттердің сипаттамасы.

Кіріспе

Әлемнің индустриалды дамыған елдерінде ресурстарды үнемдейтін және энергияны үнемдейтін технологиялар барған сайын дамып келеді, қалдықтарды қайта өңдеу, жер қойнауының қорларын ұтымды пайдалану және өнеркәсіптің қоршаған ортаға теріс әсерін азайту мәселелеріне үнемі назар аударылады.

Көптеген Еуропа мемлекеттерінде олардың отын-энергетикалық балансында қамыс, қамыс және сабан маңызды орын алады. Арнайы дизайнға қазандықтарда мал азығы немесе төсек ретінде пайдаланылмайтын қамыс және сабанды жағу жылу энергиясын алудың ұтымды әдісі болып табылады. Қамыстан сапалы отын алу мәселелерін зерттеу осы ресурстың едәуір шоғырланған жерлерінде осындай кәсіпорындардың пайда болуына ықпал етеді, ал мұндай отынды пайдалану муниципалитеттер мен жеке тұтынушылардың жылу өндірісіне шығындарын едәуір төмендетеді. Тікелей жағу үшін қамыс, қамыс және сабанды пайдалану атмосфераға көмірқышқыл газының шығарылуын азайтудың бір жолы болып табылады. Қамысты және сабанды жағу үшін жинау, тасымалдау және дайындау кезінде пайда болатын көмірқышқыл газының қосымша шығарындыларын ескере отырып, қазандықта жағылған көмірді қамыс, мысыққұйрық және сабан аралас брикеттерге ауыстыру кезінде CO₂ эмиссиясының төмендеуі шамамен 90% құрайды.

Материалдар мен әдістер

Зерттеу әдістері: аэро және ғарыштық түсірілімдерді талдау, өсімдіктерді зертханалық талдау (қамыс).

Нәтижелер және талқылау

Биомассаның әлемдік энергия балансына қосқан үлесі 10-15%-ға бағаланып, жекелеген елдерде 23%-ға жетеді (Финляндия). Жердегі биомассаның жылдық өсімі 220 млрд. тоннаны құрайды, бұл химиялық байланыстардың энергиясы ретінде 4×10^{21} Дж энергияға дейін сақтауға мүмкіндік береді [1]. Киото хаттамасының қабылдануы негізінен энергия алу үшін биомассаны жағу технологияларына қызығушылықты тудырды.

Экологиялық тұрғыдан алғанда, биомасса қазба отындарына қарағанда қауіпсіз болып саналады. Оны жағу кезінде мұнай өнімдері мен көмірді жағуға қарағанда SO₂, HS, NO_x және басқа ластаушы заттардың аз

мөлшері түзіледі. Биомассаны жағу кезінде көмірқышқыл газының (CO₂) шығарындылары бейтарап болып саналады, өйткені ол тұйық циклде және оның мөлшері биомассаның табиғи ыдырауы кезінде бөлінетін CO₂ көлеміне тең. Энергетикалық мақсаттар үшін биомасса негізінен дәстүрлі қазбаны алмастыратын отын ретінде қолданылады. Мұнда, ең алдымен, ағаш кесу, ағаш өңдеу өнеркәсібінің қалдықтары мен қалдықтары, өсімдік шаруашылығы қалдықтары туралы айтылады. Оның ішінде ылғал сүйгіш өсімдік ретінде ол едәуір көлемде және табиғи жағдайда өсетін жерлерде ерекше қызығушылық тудыратын қамыс биомассасы, өйткені ол алаңдарды дайындауға, ауылшаруашылық технологиясына, тыңайтқыштарға және т. б. шығындарды қажет етпейді. сондықтан қамыс биомассасын экономикалық, экологиялық және экономикалық мәселелерге әсер етуі мүмкін нақты жылу энергетикалық көзі ретінде қарастыруға болады. Әлеуметтік маңызы бар. Қазақстан аумағының орасан зор көлемін ескере отырып, жердегі дәстүрлі зерттеулер гидрофитті арамшөптердің (қамыс, мысыққұйрық және қамыс) таралуы үшін қолайлы жағдайлары бар аумақтарды ғарыштық мониторингтеу мүмкіндіктерімен толықтырған жөн. Осыған байланысты, Қазақстан аумағындағы қамыс, мысыққұйрық және қамыстың өсу ортасын мониторингтеудің спутниктік технологияларын әзірлеуге көп көңіл бөлу қажет.

Түсірілім жиілігі, суреттердің кеңістіктік ажыратымдылығы, аумақты бір түсірілім көрінісімен қамту, қажетті спектрлік арналардың болуы, түсірілім құны, сондай-ақ деректерді алудың қарапайымдылығы - бұл ғарыштық түсірілімдердің негізгі сипаттамалары, олардың таңдауы бақылаудың сәттілігіне байланысты.

Сонымен, Terra/MODIS деректерін пайдалану 2001 жылдан бастап қазіргі уақытқа дейін күнделікті қайталанумен тіркелген параметрлерді байқауға мүмкіндік береді, бірақ төмен бөлшектермен (250 м). KazEOSat-2 суреттерін пайдалану аумақты жоғары ажыратымдылықта (6,5 м) байқауға мүмкіндік береді, алайда шағын учаскелерде және тек 2014 жылдан бастап. Sentinel-2A суреттерін пайдалану 2015 жылдан бастап ауылшаруашылық жерлерін жеткілікті кеңістіктік дәлдікпен бақылауға мүмкіндік береді. Landsat суреттерін пайдалану - 1972 жылдан бастап 16 күндік жиілікпен және 1:200 000 масштабты карталарды жасау үшін жеткілікті ажыратымдылықпен (30 м).

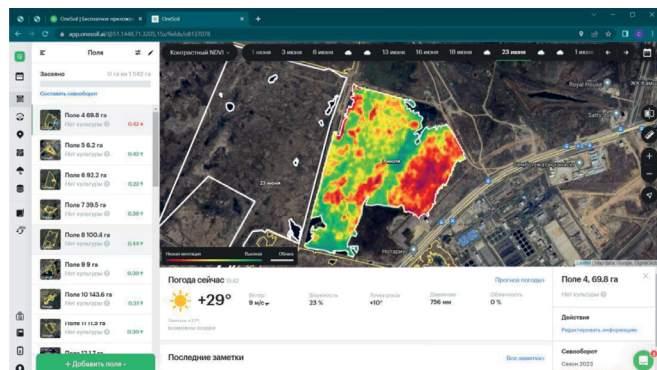
Спутниктік суреттердегі өсімдік объектілерін танудың қиындығы - өсу мен даму процесінде вегетациялық кезеңде өсімдіктер айтарлықтай өзгерістерге ұшырайды. Қажетті көлемде қажетті ақпаратты қашықтықтан зондтау мен жердегі бақылаулардың көп уақыттық деректерін бірлесіп түсіндіру негізінде ғана алуға болады. Ғарыштық суреттердегі өсімдік жамылғысының экологиялық жағдайын дешифрлеу жөніндегі жұмыстардың жалпы технологиялық схемасы мынадай кезеңдерден тұрады: қашықтықтан

зондтау деректерін алдын ала өңдеу, камералдық тақырыптық дешифрлеу, жер үсті деректерін алу, тақырыптық дешифрлеу нәтижелерін тексеру және нақтылау.

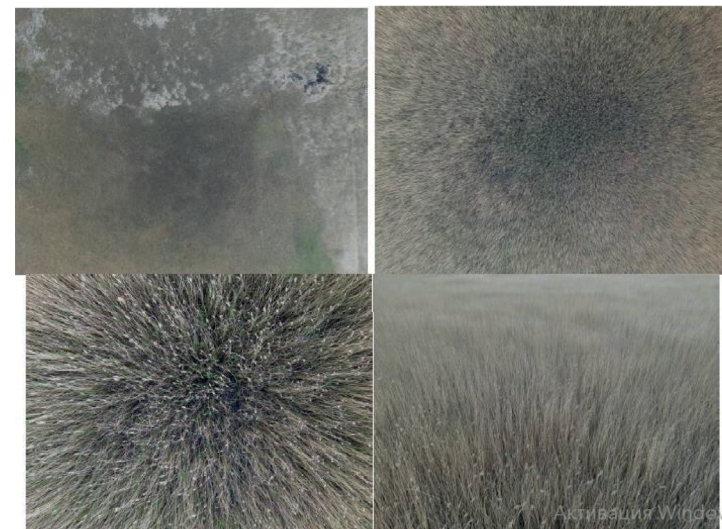
Бақылау кезінде қолданылатын әдістер үш негізгі топқа бөлінеді. Әдістердің бірінші тобы абиотикалық айнымалыларды (рельеф, жауын-шашын, температура және т.б.) қолдана отырып, белгілі бір биологиялық түрге қолайлы жағдайларды модельдеумен байланысты. Есептеулер кеңінен танымал SRTM, Wordclim, BioClim, Global-Pet және басқа да бірқатар мәліметтер жиынтығы бойынша жүргізіледі. Бұл жағдайда салмақты белгілерді іріктеу негізінде ықтималдық модельдеу қолданылады.

Әдістердің екінші тобы белгілі бір биологиялық түрдің таралуын реттейтін қоршаған ортаның динамикалық факторларын (өсімдік жамылғысының ауданы, топырақ температурасы, су объектілерінің ауданы және т.б.) есептеу үшін қашықтықтан зондтау деректерін өңдеумен байланысты. Спутниктік деректерді өңдеу топырақ-өсімдік жамылғысының (вегетациялық, тұздану, су және т.б.) ерекшеліктерін көрсететін спектрлік жарықтылық индекстерін қолдануға негізделген. Бұл топқа қолайлы жағдайлар моделінің дұрыстығын арттыру мақсатында Спутниктік есептеулер корреляцияланатын топырақ-өсімдік жамылғысының сипаттамаларын (топырақтың ылғалдылығы, температурасы, өсімдік сипаттамалары) аспаптық өлшеумен жердегі бақылау әдістері де кіреді [2].

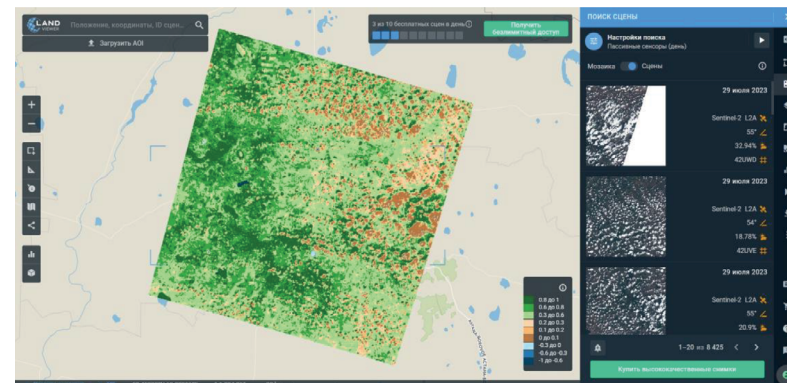
Бақылау алаңы ретінде Астана қаласының аумағында қамыс өсетін алаң таңдалды, онда зертханалық зерттеулер жүргізу үшін өсімдік үлгілері іріктелді.

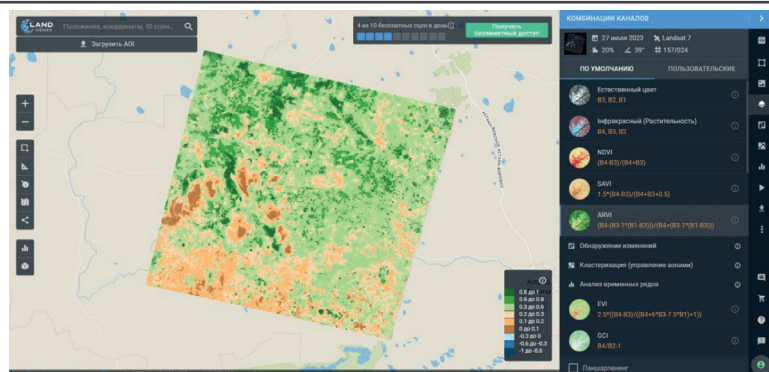


1-сурет – Зертханалық зерттеулер жүргізу үшін қамыс жинайтын орын



2-сурет –Өр түрлі биіктіктен (10-нан 500 метрге дейін) дрон көмегімен алынған зертханалық зерттеулер жүргізу үшін қамыс жинау орны





3-сурет – Ақмола облысының өртүрлі аудандарында қамыс, мысыққұйрық өсетін учаскелердің орналасуы (0.8-1-кою жасыл және 0.6-0.8 ашық жасыл)

Ғарыштық спутниктер арқылы және дрондардың көмегімен зерттегенде, жалпы ауданы 146 219 км² (14 621 900 га) болатын Ақмола облысында ғана жалпы ауданы 17220,7 га құрақ өсетін 158 өріс табылды [3,9,10,11]. Бағалау деректері бойынша Қазақстанда қамыс, мысыққұйрық шамамен 2 миллион гектарға тең аумақты алып жатыр. Аэро және ғарыштық суреттерді қолдану арқылы жазда қамыс, мысыққұйрық анықтауға болатын белгілер анықталды (0.8-1 – кою жасыл және 0.6-0.8 ашық жасыл).

Бақылау алаңынан жиналған өсімдіктердің элементтік құрамы (қамыс) LECO CHN628 +S элемент анализаторы 16948 (838216) 2016 ÇSN EN ISO стандартына сәйкес аспаптық әдістермен автоматты түрде өлшеу үшін пайдаланылды (1-кестеде көрсетілген) [3,8].

1-кесте – Көміртекті (C), сутекті (H) және азотты (N) (аспаптық әдістермен) анықтау бойынша өлшеу нәтижелері

Үлгі ілудің атауы (қайталану)	Аналитикалық үлгінің салмағы (г)	Көміртек (%)	С у т е к (%)	А з о т (%)	Көміртек (мг)	Сутек (мг)	Азот (мг)
Қамыс	0,1008	44,705	6,1744	0,55327	48,131	6,3907	0,57510
Қамыс	0,1058	44,558	6,1186	0,56580	50,351	6,6470	0,61730
Қамыс	0,1085	44,411	6,1043	0,56334	51,467	6,8008	0,63029
Орташа	-	44,56	6,13	0,56	49,98	6,61	0,61

Қамыстан жанармай брикеттерін алу технологиясын қарастырыңыз [3-4]. Жанармай брикеттерін өндіруге арналған шикізат 2025 жылдың сәуірінде

тандалды. Ұқсас жағдайда құрғақ қамыстың массасы 2024 жылғы егіннің ұзын талшықты өсімдік материалы болды, оның сабағы өте қатты және берік болды, бұл оны зертханалық жағдайда ұнтақтаудың технологиялық әдістерін анықтады:

- қамыс сабақтарын 20-30 мм фрагменттерге кесу;
- мұндай фрагменттерді бұрандалы қайта өңдеу механизмінде 2 рет қайта өңдеу. Бұранданың басына торлары бар екі кескіш пышақ орнатылады.

Екі кескіш пышақты орнату қамыстың талшықты компоненттерін орау арқылы механизмнің кептелуіне жол бермейді. Алынған ұсатқышты ылғалдылық пен күлге бағалау керек. Содан кейін шикізат массасы дайын өнім сапасының бастапқы шикізат сипаттамаларына тәуелділігін зерттеу мақсатында 7,5,3,2,1 мм тесік диаметрі бар електер жиынтығының көмегімен фракцияланады (сепарацияланады).

Брикеттеу – түйіршікті отын өндірісінің барлық процесінде ең маңызды және энергияны қажет ететін операция. Брикеттеу механизмі және дайын өнімнің сапасы негізінен престелетін материалдың құрылымдық-механикалық және физика-химиялық қасиеттеріне, сондай-ақ престеу режимі мен шарттарына байланысты. Престеу 5-тен 40 тоннаға дейін өртүрлі престеу күштерімен зертханалық баспасөзде жүзеге асырылады.

Өртүрлі пішіндер мен өлшемдегі отын үлгілерін алуға мүмкіндік беретін өртүрлі матрицалық құралды пайдалануға болады:

- брикет өлшемдері - $l \times d \times H = 72 \times 30 \times 25$ мм;
- цилиндрлік түйіршіктер – $d = 22$ мм, $h = 16-20$ мм.

Сығымдалған материал бөлшектерінің фракциялық құрамы мен мөлшері сапалы брикеттерді алуға айтарлықтай әсер етеді.

Брикеттеудің молекулалық теориясына сәйкес [5], бөлшектер арасындағы меншікті күш формула бойынша анықталады:

$$N = \frac{A}{r} f(\psi), \quad (1)$$

Мұндағы r - жанасатын бөлшектердің радиусы;
 $f(\psi)$ – бір табиғаттағы жазық беттердің 1 см² жанасуына есептегенде бір-біріне жабысатын бөлшектердің бөлінуінің нақты жұмысы.

Демек, сығылатын материалдың бөлшектерінің мөлшері неғұрлым аз болса, олардың арасындағы молекулалық өзара әрекеттесу күштері соғұрлым күшті болуы керек. Алайда, бұл тәуелділік тек серпінді материалдар үшін айқын көрінеді, өйткені ірі фракцияларды басу кезінде жұмыстың едәуір бөлігі бөлшектердің сынғыш бұзылуына байланысты.

Зерттеулердің бір бөлігі ретінде қамыстан отын алудың негізгі әдісі ретінде әртүрлі мөлшердегі фракциялар белгілі бір арақатынаста араласатын фракциялық модификация әдісін қолдану ұсынылады.

Нәтижесінде, құрғақ қамыстың дөрекі фракцияларын басу кезінде (3-5 мм немесе одан да көп) үлгілердің құрылымында бөлшектердің әлсіз байланысы байқалады. Брикетте жүктемені алып тастағаннан кейін (570-тен 2280 кг/см²-ге дейінгі нақты қысым диапазонында) серпімді кеңею бар, бұл жарықтардың пайда болуына, жоғары ұсақталуға және соның салдарынан төмен беріктікке әкелуі мүмкін. Үлгілердің тығыздығы шамамен 0,65-1,045 г/см³ құрайды.

Жоғары сапалы брикет бөлшектердің мөлшері 2-3 мм және одан аз фракцияларды 1:1 қатынасында басу арқылы алынады, оларда бөлшектердің байланыстарының көбеюіне байланысты тығыздық артып, ұсақтығы төмендеді. Айта кету керек, тығыздығы 1 г/см³-тен асатын үлгілер жоғары сапалы көрініске ие болуы мүмкін және серпімді кеңеюден ең аз ақаулар (жарықтар) болуы мүмкін.

Күшті брикеттерді алу үшін сығылатын материалдың ылғалдылығы оның құрамында тек химиялық және адсорбциялық байланысқан судың болуына сәйкес келуі керек.

Бұл фактінің оң әсері материалдың келісімшартының болуымен көрінеді, яғни сыртқы жүктемені қолданбай тығыздағышта.

Престелетін органикалық материалдар оңтайлы ылғалдылықпен сипатталады, мұнда бәрі бірдей, ең жоғары тығыздықтағы және механикалық беріктігі бар брикеттер алынады. Қамыс үшін бұл көрсеткіш 8-10% аралығында болады және ауа құрғақ күйінде қамыс ұсатқыштың ылғалдылығына сәйкес келеді.

Ылғалдылықтың жоғарылауы жану жылуының төмендеуіне, кептіруге кететін энергия шығындарының артуына және брикеттердің физикалық-механикалық сипаттамаларының күрт төмендеуіне әкеледі. Сондай-ақ, отын брикеттерінің оңтайлы ылғалдылығы сақтау шарттарына сәйкес келуі керек, яғни.тепе-теңдік. Брикеттердің ылғалдылығы тепе-теңдіктен төмен болған кезде қоршаған ауадан ылғалдың сіңуі тепе-теңдік ылғалға дейін болады.

Брикеттеуге арналған күлдің шегі күлдің отынның жану жылуын төмендететін балласт компоненті болып табылатындығын, технологиялық жабдықтың абразивті тозуына ықпал ететіндігін және балқу температурасы төмен болған кезде оттықтың торлы торларын қопсытатындығын ескере отырып белгіленеді.

Сондықтан бұл көрсеткіш ≤ 15 % деңгейінде белгіленеді және зерттелетін қамыстың нақты деректеріне (5 %) сәйкес келеді. Престеу қысымы бөлшектердің өзара байланысқа жақындауын және оларды сутегі

байланыстарының, молекулааралық күштердің әсерінен ұстап тұруын қамтамасыз етуге арналған. Престеудің салыстырмалы төмен қысымында бөлшектер көрсетілген күштердің көрінісін қамтамасыз ететін қашықтыққа жақындамайды, нәтижесінде брикеттің жарылуы мен ұсақталуының жоғарылауына әкеледі. Көптеген зерттеулер [5-7] және практикалық тәжірибе көрсеткендей, қамыс ұсақтағыштың оңтайлы қысымы шамамен 100-1500 кгс/см² құрайды.

Жұмыста қолданылатын екінші модификация әдісі қоспаның (байланыстырғыштың) сұйық ерітіндісін массасы бойынша 5-16% аралығында кептіргішке енгізу болды.

Байланыстырушы қоспалар ретінде крахмалдың сұйық ерітіндісі, сондай-ақ целлюлоза - қағаз өнеркәсібінің кең ауқымды қалдығы болып табылатын лигносульфанаттың сұйық ерітіндісі пайдаланылды. Қамыс ұсатқышының құрамына едәуір мөлшерде ($\approx 50\%$) лигнин және пентозандар сияқты заттар кіреді, олар жоғары молекулалы қосылыстар болып табылады, табиғаты бойынша гидрофобты. Сонымен қатар, байланыстырғыштың белгілі бір мөлшері мен сапасын енгізу бойынша қосымша технологиялық операция отын брикеттерін өндіру процесін қиындатуға және олардың қымбаттауына ықпал етеді. Сұйық байланыстырғышты енгізумен зертханалық тәжірибелер жүргізу кезінде оны сығымдау кезінде сығу байқалады, бұл осы қоспаларды енгізу тиімділігін айтарлықтай төмендетеді.

Отын түйіршіктерін/қамыс брикеттерін өндірудің кейбір ерекшеліктерін атап өткен жөн. Вегетациялық кезеңнен кейін (күзде, қыста) жиналған қамыстың ылғалдылығы шамамен 37-45% құрайды. Қамысты кептіру және ұнтақтау оңай. Қамыстың сабанға қарағанда басты артықшылығы - калийдің төмен мөлшері, бұл күлдің салыстырмалы түрде жоғары балқу температурасын қамтамасыз етеді. Бұл көрсеткіш бойынша материал ағашқа жақын.

Қазақстанда қамысты отын ретінде пайдаланған кезде өндіріс ауқымы мен электр энергиясының құнына байланысты шикізатты сатып алуға жұмсалатын шығындардың жоқтығын ескере отырып, орташа құны 10-15€ құрайды. Жабдықтың өнімділігі сағатына 2 тонна түйіршік болса, бұл көрсеткіш 20€-ға жақын болады.

Қорытындылар

Осылайша, бұл мақалада құрғақ қамыстан таза отын өндірудің негізгі технологиялық операциялары зерттелді және аймақтық деңгейде қол жетімді энергия өнімін алу мүмкіндігі көрсетілді. Бұл жағдай қамыс, мысыққұйрық өсірудің үлкен аудандарын экономикалық айналымға тартуға және олардың өрт қауіпсіздігін арттыруға ықпал етуі керек. Қамыс, мысыққұйрық және олардан жасалған брикеттер жергілікті отын болып табылады, экологиялық бейтарап, жаңартылатын, сондықтан олардан отын түйіршіктерін өндіру мен

қолданудың пайдасына бірқатар тұжырымдар жасауға болады. Біріншіден, қамыс брикеттері, оралған сабаннан айырмашылығы, үлкен жану жылтуына ие, сақтау кезінде аз аумақты алады, өйткені олардың тығыздығы жоғары. Екіншіден, брикеттерді көлік шығындарының тым жоғары болуынан қорықпай ұзақ қашықтыққа тасымалдауға болады. Үшіншіден, брикеттердің ылғалдылығы төмен және өрт қауіпсіздігі жоғары. Төртіншіден, брикет жабдықтары сабан жағатын жабдықтармен салыстырғанда аз аумақты алады. Бесіншіден, брикеттерді автоматтандырылған түрде беру оттыққа да, қойма орындарына да оңай жүзеге асырылады. Алтыншыдан, артық отын түйіршіктерін өндірілетін өнімнің өзіндік құнын төмендететін қосымша табыс алу арқылы тиімді сатуға болады.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

1 Малахов, Д. В., Цычуева, Н. Ю., Витковская, И. С. Моделирование экологической ниши септориоза пшеницы с применением данных дистанционного зондирования Земли // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – Москва, 2017. – Т. 14, № 1 – Б. 113–124.

2 Цычуева, Н. Ю., Малахов, Д. В. Методика детектирования орошаемых угодий с использованием спутниковых данных и ГИС // Водные ресурсы Центральной Азии и их использование. – Алматы, 2016. – Б. 182–189.

3 Шахматов, К. Л. Особенности получения топливных брикетов и гранул биомассы тростника (*Phragmites Australis*) выработанного месторождения Чувицино Калининского района Тверской области. Труды Инсторфа 10, 2015. – Б. 29–33.

4 Биоэнергетика в России в XXI веке / ФГБУ РЭА Минэнерго РФ, Российское энергетическое агентство. – М., 2012 г. – 37 б.

5 Наумович, В. М. Теоретические основы брикетирования торфа. – Минск, АН БССР, 1960 – 196 б.

6 Архангельский, К. Н. Брикетирование древесных опилок. – М., Гослесбумиздат, 1957. – 165 б.

7 Суворов В. И., Соловьев Н. Л. Отчет о НИР «Исследование особенностей получения из биомассы тростника прессованного топлива». – Тверь, ТвГТУ, 2006. – 24 б.

8 Tatiana Alexiou Ivanova, Kseniia Paramonova, Olzhas Talipov, Nariman Tanyrbergenov, Talgat Zhakupov, Aibek Akayev. Assessment of Common Reed (*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.) Biomass Suitability for Solid Biofuels Production // Sustainability. 2024, 16(17), 7378; <https://doi.org/10.3390/su16177378>.

9 OneSoil: платформа агротехнологий [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://onesoil.ai/ru/> (дата обращения: 01.10.2025).

10 EOS Data Analytics [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://eos.com/> (дата обращения: 01.10.2025).

REFERENCES

1 Malaxov, D. V., Sichueva, N. Yu., Vitkovskaya, I. S. Modelirovanie ekologicheskoy nishi septorioza pshenisi s primeneniem dannix distansionnogo zondirovaniya Zemli [Modeling of the ecological niche of wheat septoria using Earth remote sensing data] // Sovremennye problemi distansionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. – Moscow, 2017. – T. 14, №1 – P. 113-124.

2 Sichueva, N. Yu., Malaxov, D. V. Metodika detektirovaniya oroshaemix ugodiy s ispolzovaniem sputnikovix dannix i GIS [A technique for detecting irrigated land using satellite data and GIS] // Vodnye resursi Sentralnoy Azii i ix ispolzovanie. – Almati, 2016. – P. 182–189.

3 Shaxmatov, K. L. Osobennosti polucheniya toplivnix briketov i granul biomassi trostnika (*Phragmites Australis*) virabotannogo mestorojdeniya Chuvisino Kalininskogo rayona Tverskoy oblasti [Features of obtaining fuel briquettes and pellets of biomass of reed (*Phragmites Australis*) from the developed Chuvitsino deposit in the Kalininsky district of the Tver region]. Trudi Instorfa 10, 2015. - P. 29-33.

4 Bioenergetika v Rossii v XXI veke [Bioenergy in Russia in the 21st century] / FGBU REA Minenergo RF, Rossiyskoe energeticheskoe agentstvo. – M., 2012 g. – 37 p.

5 Naumovich, V. M. Teoreticheskie osnovi briketirovaniya torfa [Theoretical foundations of peat briquetting]. – Minsk, AN BSSR, 1960 – 196 p.

6 Arxangelskiy, K. N. Briketirovanie drevesnix opilok [Briquetting of sawdust]. – M., Goslesbumizdat, 1957. – 165 p.

7 Suvorov V. I., Solovlev N. L. Otchet o NIR «Issledovanie osobennostey polucheniya iz biomassi trostnika pressovannogo topliva» [R&D report "Investigation of the peculiarities of obtaining compressed fuel from cane biomass"]. – Tver, TvGTU, 2006. – 24 p.

8 Tatiana Alexiou Ivanova, Kseniia Paramonova, Olzhas Talipov, Nariman Tanyrbergenov, Talgat Zhakupov, Aibek Akayev. Assessment of Common Reed (*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.) Biomass Suitability for Solid Biofuels Production [Assessment of Common Reed (*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.) Biomass Suitability for Solid Biofuels Production]. // Sustainability, 2024, 16(17), 7378; <https://doi.org/10.3390/su16177378>.

9 OneSoil: platforma agrotekhnologii [OneSoil: Agrotechnology Platform] [Electronic resource]. — Access mode: <https://onesoil.ai/ru/> (accessed: 01.10.2025).

10 EOS Data Analytics [Electronic resource]. — Access mode: <https://eos.com/> (accessed: 01.10.2025).

08.09.25 ж. баспаға түсті.

08.09.25 ж. түзетулерімен түсті.

09.09.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

Ы. С. Құстаулетов¹, Н. М. Танырберген²,

О. М. Талипов³, Т. М. Жакупов⁴

^{1,2}Восточно-Казахстанский технический университет имени

Д. Серикбаева Д. Серикбаева, Республика Казахстан, г. Оскемен,,

Қазақстан Республикасы, Өскемен қаласы;

³Торайғыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар,

⁴ТОО «Green Thermal Energy», Республика Казахстан, г. Павлодар,

Поступило в редакцию 08.09.25

Поступило с исправлениями 08.09.25

Принято в печать 09.09.25

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУЧЕНИЯ ЭНЕРГИИ ИЗ ТРОСТНИКА, РОГОЗА ЗА РУБЕЖОМ И В КАЗАХСТАНЕ

Вклад биомассы в мировой энергетический баланс оценивается в 10–15 %, а в некоторых странах достигает 23 % (Финляндия). Ежегодный прирост биомассы на Земле составляет 220 млрд тонн. В этой статье анализируется возможность использования тростника и рогоза путем производства смешанных топливных брикетов. Большой проблемой в Республике Казахстан являются камышовые заросли, занимающих площадь около 2 млн. га. В низовьях и дельтах рек Иле, Шу, Сырдарья, Каратау и Аксу, на берегах озер Балхаш и других, а также в заболоченных местах расположены крупные массивы камыша, тростника и рогоза. Все это приводит к сильным пожарам в жаркое время. Тростник, камыш и рогоз - это участки сельскохозяйственных угодий, грядки оросительных каналов и т. д., засорение гидрофитными сорняками, с которыми необходимо бороться различными способами, в том числе химическими. Эти растения характеризуются очень высоким содержанием углерода. В этой связи актуальным становится развитие малых

и средних предприятий по переработке сельскохозяйственных отходов в товарную продукцию. В статье проанализированы энергетические характеристики топливных брикетов, изготовленных из сельскохозяйственных отходов, таких как тростник с добавлением соломы. Проведен обзор литературы, а также проведено декодирование воздушных, космических изображений тростниковых полей Акмолинской области Республики Казахстан, из анализа которого выявлена целесообразность проведения исследований по выбранному вопросу, что связано с преимуществами использования тростниковых брикетов в сельском хозяйстве.

Ключевые слова: тепловая энергия, топливный брикет, тростник, рогоз, сельскохозяйственные отходы, утилизация отходов, описание брикетов.

Y. S. Kustauletov¹, N. M. Tanyrbergenov², O. M. Talipov³, T. M. Zhakupov⁴

^{1,2}D. Serikbayev East Kazakhstan State Technical University,

Republic of Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk

³Toraighyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar

⁴Green Thermal Energy LLP, Republic of Kazakhstan, Pavlodar

Received 08.09.25

Received in revised form 08.09.25

Accepted for publication 09.09.25

RESEARCH ON ENERGY PRODUCTION FROM REEDS, CATTAILS ABROAD AND IN KAZAKHSTAN

The contribution of biomass to the global energy balance is estimated at 10-15 %, and in some countries it reaches 23% (Finland). The annual growth of biomass on Earth is 220 billion tons. This article analyzes the possibility of using reeds and cattails by producing mixed fuel briquettes. Reed beds, covering an area of about 2 million hectares, are a big problem in the Republic of Kazakhstan. In the lower reaches and deltas of the Ile, Shu, Syrdarya, Karatau and Aksu rivers, on the shores of Lakes Balkhash and others, as well as in wetlands, there are large arrays of reeds, reeds and cattails. All this leads to severe fires in hot weather. Reeds, reeds, and cattails are areas of agricultural land, beds of irrigation canals, etc. For example, clogging with hydrophytic weeds, which must be combated in various ways, including chemical ones. These plants are characterized by a very high carbon content. In this regard, the development of small and medium-sized enterprises for processing agricultural waste into

commercial products is becoming relevant. The article analyzes the energy characteristics of fuel briquettes made from agricultural waste, such as cane with the addition of straw. A review of the literature was conducted, as well as decoding of aerial and space images of reed fields in the Akmola region of the Republic of Kazakhstan, from the analysis of which the expediency of conducting research on the selected issue was revealed, which is associated with the advantages of using reed briquettes in agriculture.

Keywords: thermal energy, fuel briquette, reed, cattail, agricultural waste, waste disposal, briquette description.

МРНТИ 44.37.29

<https://doi.org/10.48081/QRUF1160>

***Н. Б. Құттыбай¹, Д. К. Сыбанбаева², С. О. Орынбасар³,
А. А. Каппарова⁴, А. Б. Болатбек⁵**

^{1,2,3,4,5}Қазақский Национальный Университет имени аль-Фараби,
Республика Казахстан, г. Алматы

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5723-6642>

²ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-8713-2042>

³ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-9124-2560>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-8348-902X>

⁵ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-7613-5507>

*e-mail: nurjigit.10.93@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТИПОВ КОНТРОЛЛЕРОВ НА ВЫХОДНУЮ МОЩНОСТЬ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В статье представлена сравнительная оценка производительности двух типов контроллеров: системы отслеживания точки максимальной мощности (ОТММ) и контроллеров, основанных на широтно-импульсной модуляции (ШИМ), применительно к различным конфигурациям фотоэлектрических установок. Анализ охватывает как фиксированные солнечные панели, так и установки с одноосными и двухосными механизмами слежения за солнцем. Целью исследования являлась проверка гипотезы о том, что замена дорогостоящих ОТММ-контроллеров на более экономичные ШИМ-контроллеры может быть оправдана в условиях минимального влияния на общую энергетическую эффективность. Для оценки различий в работе контроллеров использовались статистические методы: критерий Стьюдента и критерий Колмогорова–Смирнова. Результаты показали, что в случае фиксированных фотоэлектрических систем статистически значимых отличий в эффективности между контроллерами не наблюдается ($p > 0,05$ по обоим критериям), что открывает возможность снижения капитальных затрат без ущерба для производительности. Однако в установках с трекерами эффективность ОТММ оказалась существенно выше, что

подтверждается низкими значениями p ($p < 0,05$), указывающими на достоверные различия. Таким образом, было установлено, что рациональность применения того или иного типа контроллера зависит от архитектуры системы. Если в фиксированных системах допустима установка более простых ШИМ-контроллеров, то в трекерах их использование приводит к потерям в выработке энергии. Полученные выводы имеют практическую значимость при проектировании и оптимизации солнечных энергетических установок с учётом соотношения «затраты – эффективность».

Ключевые слова: фотоэлектрические установки, контроллер ОТММ, контроллер ШИМ, статистический анализ, энергетическая эффективность.

Введение

В условиях стремительного истощения ископаемых энергетических ресурсов и нарастающих экологических проблем переход к возобновляемым источникам энергии становится жизненно необходимым для обеспечения устойчивого развития. Среди всех видов возобновляемых источников энергии особенно перспективной считается солнечная энергия, поскольку она доступна в большинстве регионов, экологически безопасна и обладает значительным потенциалом для масштабирования. При этом фотоэлектрические модули играют ключевую роль в преобразовании солнечного излучения в электрическую энергию, составляя основу солнечных энергетических систем [1; 2].

Несмотря на активное развитие технологий, доля солнечной энергии в мировом энергобалансе остаётся относительно низкой. Основными ограничениями являются сравнительно невысокий коэффициент полезного действия (КПД) коммерческих модулей и высокая стоимость их производства и установки. Эффективность фотоэлектрических систем значительно снижается при частичном затенении и нестабильной освещённости, что характерно для реальных условий эксплуатации. В этой связи ведётся активная разработка как конструктивных, так и алгоритмических решений, направленных на повышение энергоэффективности [3].

В числе перспективных направлений можно отметить использование многопереходных солнечных элементов с разной шириной запрещённой зоны, применение оптических концентраторов [4], а также солнечных трекеров, позволяющих модулям следовать за движением солнца и увеличивать уровень поглощаемой радиации [5; 6]. Сравнительные исследования показывают, что одноосные и двухосные трекеры значительно превосходят стационарные установки по показателям генерации энергии. Однако внедрение таких

систем требует эффективных методов управления и оптимизации процессов преобразования энергии.

Ключевым элементом управления в фотоэлектрических системах выступают контроллеры заряда аккумуляторных батарей. Наиболее эффективными считаются контроллеры отслеживания точки максимальной мощности (ОТММ), которые адаптируют работу системы к текущим условиям освещённости и обеспечивают получение максимальной выходной мощности. Также применяются более простые контроллеры, работающие на принципе широтно-импульсной модуляции (ШИМ), реализующие заряд аккумуляторов за счёт изменения длительности управляющих импульсов. Существуют различные алгоритмы ОТММ – от классических до интеллектуальных и оптимизационных, причём последние демонстрируют лучшие результаты в условиях частичного затенения за счёт способности находить глобальные максимумы мощности [7].

Результаты ряда исследований свидетельствуют, что сочетание солнечных трекеров с ОТММ-контроллерами обеспечивает более высокую энергетическую эффективность по сравнению со стационарными модулями [8; 9]. Тем не менее, в мировой практике наибольшее распространение получили именно стационарные фотоэлектрические установки, что связано с их конструктивной надёжностью и меньшими инвестиционными затратами. Это подчёркивает важность проведения всестороннего анализа технико-экономической целесообразности использования контроллеров ОТММ в сравнении с контроллерами ШИМ в различных типах фотоэлектрических установок. [10; 11].

В данной работе проведено углублённое сравнительное исследование эффективности контроллеров ОТММ и ШИМ с использованием статистических методов анализа. Применены два ключевых подхода: проверка различий между выборками и сопоставление распределений. На основе годового массива данных по глобальной горизонтальной освещённости и расчётных значений выходной мощности фотоэлектрических систем с солнечными трекерами и с фиксированным положением выполнена количественная оценка влияния типа контроллера на производительность систем.

Новизна данной работы заключается в применении комплексного статистического подхода к анализу эффективности различных типов контроллеров в фотоэлектрических системах различной конфигурации на основе реальных климатических данных. Полученные результаты позволяют обоснованно подходить к выбору технических решений, обеспечивая оптимальное соотношение между энергетической производительностью и экономическими затратами, что имеет практическую ценность при

проектировании и эксплуатации современных солнечных энергетических систем.

Материалы и методы

В настоящем исследовании для анализа эффективности контроллеров зарядки аккумуляторных батарей были применены два статистических метода – т-критерий Стьюдента и критерий Колмогорова–Смирнова. Первый из них позволил провести сравнение выборок по их средним значениям, а второй – оценить степень соответствия распределений полученных данных, обеспечив комплексную проверку различий между контроллерами.

В рамках исследования был проведён теоретический расчёт вырабатываемой мощности фотоэлектрических систем с учётом солнечной радиации, поступающей в течение года. Для анализа использовались данные солнечного излучения за 2024 год, включающие показатели глобальной горизонтальной радиации (GHI), прямой нормальной радиации (DNI) и рассеянного излучения (DI). Расчёт количества солнечного излучения, падающего на горизонтальную поверхность земли, осуществлялся по формуле:

$$GHI = DNI * \cos\theta_{\text{сол}} + DI \quad (1)$$

где $\theta_{\text{сол}}$ – угол высоты Солнца над горизонтом.

Мощность, вырабатываемая фотоэлектрической системой, зависит от её конструктивных особенностей. Расчёт солнечной радиации для фиксированных панелей, одноосных и двухосных трекеров проводился по следующим уравнениям:

Для двухосных трекеров:

$$G_d = DNI + DI \quad (2)$$

Для одноосных трекеров:

$$G_o = DNI * \cos(\Delta\theta) + DI \quad (3)$$

Для фиксированных панелей:

$$G_{\phi} = DNI * \cos(\Delta\theta) * \cos(\Delta\gamma) + DI \quad (4)$$

где $\Delta\theta$ – угол между нормалью к поверхности панели и направлением на Солнце в вертикальной плоскости, $\Delta\gamma$ – соответствующий угол в горизонтальной плоскости.

Одноосные трекеры отслеживают Солнце по азимуту в течение дня, при этом угол наклона панели в вертикальной плоскости остаётся фиксированным, равным географической широте местности. Для Алматы оптимальный угол наклона составляет 45° , что используется как для фиксированных панелей, так и для одноосных трекеров.

Выработка электроэнергии E рассчитывается по формуле:

$$E = G * \eta_{\text{п}} * \eta_{\text{к}} * A \quad (5)$$

где: G – мощность солнечного излучения (по формулам выше), $\eta_{\text{п}}$ – КПД солнечной панели, $\eta_{\text{к}}$ – КПД контроллера, A – площадь солнечной панели.

В расчётах использовалась солнечная панель мощностью 60 Вт. Рассматривались контроллеры двух типов: ОТММ и ШИМ. КПД контроллера ОТММ варьировался от 97,5 % до 80 %, а КПД ШИМ – от 85 % до 75 %.

На рисунке 1 представлены месячные графики выходной мощности фотоэлектрических систем в течение года. Видно, что системы с одноосным и двухосным трекерами имеют схожий профиль мощности, однако одноосный трекер генерирует меньше энергии. Фиксированная система демонстрирует отличную форму и меньшую величину мощности. Минимальная мощность фиксированной системы – 2,6 кВт·ч, у трекеров – около 3,8 кВт·ч.

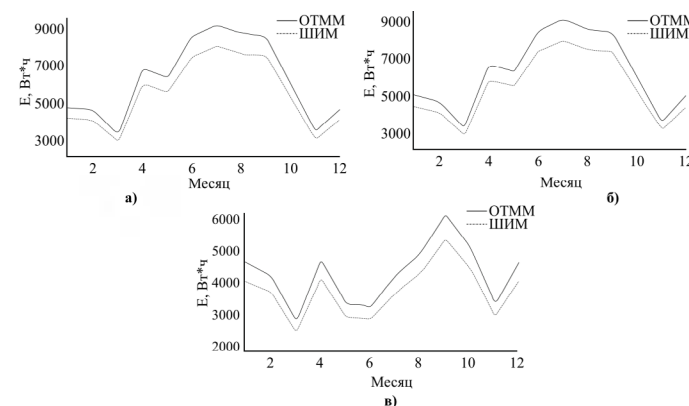


Рисунок 1 – Графическое представление с указанием погрешностей значений выходной мощности, полученной за год эксплуатации каждой из фотоэлектрических установок: одноосный трекер (а), двухосный трекер (б), стационарная установка (в)

Выходная мощность фотоэлектрических систем преобразовывалась с помощью двух типов контроллеров – ОТММ и ШИМ. Исходя из предварительных предположений, ожидалось, что контроллер ОТММ обеспечит более высокую выходную мощность по сравнению с ШИМ-контроллером. Однако при использовании ШИМ-контроллера наблюдалось существенное рассеяние данных, что могло быть связано с его менее точной адаптацией к изменениям во входной мощности, в отличие от более оперативного отклика ОТММ.

Для проверки этой гипотезы применялись два статистических критерия: т-критерий Стьюдента и критерий Колмогорова–Смирнова. Первый из них позволяет оценить, насколько различия между средними значениями эффективности двух групп являются статистически значимыми. В контексте данного исследования нулевая гипотеза заключалась в равенстве средних значений эффективности контроллеров, а альтернативная – в наличии различий:

$$H_a = Eff_{\text{ОТММ}} \neq Eff_{\text{ШИМ}} \quad (6)$$

$$Eff = \frac{\sum Eff_i}{n} \quad (7)$$

где, Eff – среднее значение эффективности контроллера, n – количество наблюдений в выборке.

$$Sd = \sqrt{\frac{\sum (Eff_i - Eff)^2}{n-1}} \quad (8)$$

$$m_r = \frac{Sd}{\sqrt{n}} \quad (9)$$

где, Sd – стандартное отклонение, m_r – ошибка репрезентативности.

На основе этих значений вычислялся т-критерий по формуле:

$$t = \frac{Eff_{\text{ОТММ}} - Eff_{\text{ШИМ}}}{\sqrt{m_{\text{ОТММ}}^2 + m_{\text{ШИМ}}^2}} \quad (10)$$

Критерий Колмогорова–Смирнова, в отличие от т-критерия, не требует предположения о нормальном распределении данных. Он применяется для оценки степени совпадения двух распределений. Формально он определяется выражением:

$$K_n = \sqrt{n} * \sup_x |F_0(x) - \hat{F}_n(x)| \quad (11)$$

где, $\sup_x$ – максимальное значение выражения внутри модуля по всей области определения, $F_0(x)$ – теоретическая функция распределения, – эмпирическая функция распределения на основе выборки из элементов.

Каждый из этих методов применяется в зависимости от особенностей распределения данных. В данном случае их совместное использование позволило получить более достоверные выводы.

В процессе имитационного моделирования было проведено 5000 повторений, при которых значения эффективности контроллеров задавались случайным образом в пределах заранее определённых диапазонов. На основе сгенерированных данных были рассчитаны р-значения для статистической проверки гипотез о различии в эффективности между контроллерами.

Согласно результатам анализа по т-критерию Стьюдента (рисунок 2), для одноосных и двухосных солнечных трекеров р-значения оказались существенно ниже уровня значимости 0,05. Это указывает на наличие статистически значимых различий в работе контроллеров. В случае фиксированных фотоэлектрических систем р-значения колебались в пределах от 0,046 до 0,27, а их среднее значение составило около 0,12, что не позволяет с высокой достоверностью утверждать о различиях между контроллерами.

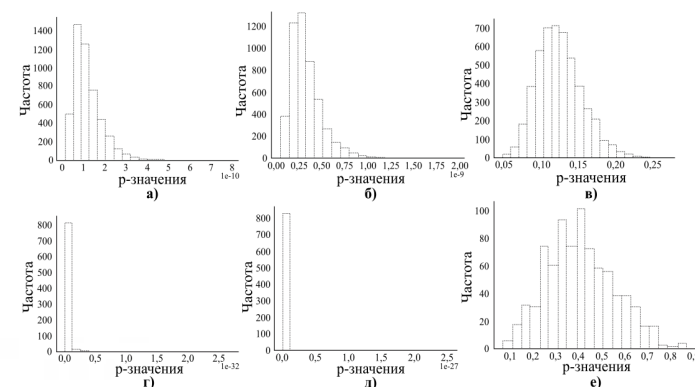


Рисунок 2 – Результаты статистического анализа: т-тест (а – двухосный трекер, б – одноосный трекер, в – фиксированная система) и тест Колмогорова–Смирнова (г – двухосный трекер, д – одноосный трекер, е – фиксированная система)

Анализ с использованием критерия Колмогорова–Смирнова (рисунок 2) также продемонстрировал, что для трекеров р-значения достигают порядка 10^{-32} , подтверждая значительные различия в распределении эффективности. Для фиксированных систем р-значения варьировались в диапазоне от 0,1 до 0,85 со средним значением около 0,4, что свидетельствует об отсутствии статистически значимых различий.

Результаты и обсуждение

Установка включает в себя солнечные панели мощностью 60 Вт. Каждая панель размещена на металлической раме: одна из них зафиксирована под оптимальным углом 45° к горизонту, вторая снабжена механизмом одноосного трекера, третья – двухосной системой слежения за Солнцем. Одноосная и двухосная системы слежения работают на основе астрономических расчётов положения Солнца.

Для определения траектории движения Солнца используются такие параметры, как угол склонения, высота Солнца над горизонтом и азимутальный угол. Вычисленные координаты заранее рассчитываются для каждого дня года и записываются на контроллер управления.

Система мониторинга параметров представлена несколькими функциональными блоками. В ней установлены датчики тока и напряжения, измеряющие значения до преобразования, а также контроллеры ОТММ и ШИМ. После контроллеров размещены дополнительные датчики, регистрирующие параметры на выходе системы. В качестве нагрузки используется аккумуляторная батарея. Центральный управляющий модуль ESP32 обрабатывает данные, поступающие от сенсоров, и передаёт их по беспроводному каналу связи.

Экспериментальные исследования проводились в условиях ясной и переменной облачности. На рисунке 3(а) представлены графики выходной мощности фотоэлектрических установок с контроллером заряда аккумулятора на основе ОТММ. Анализ показал, что применение одноосного трекера с ОТММ-контроллером обеспечивает увеличение средней выходной мощности по сравнению со стационарной фотоэлектрической системой на 12,8 % в условиях высокой солнечной активности и на 12,5 % при частичной облачности. Двухосный трекер при аналогичных условиях демонстрирует прирост выходной мощности на 15% и 13,4% соответственно.

На рисунке 3(б) приведены графики выходной мощности для трёх типов систем (стационарной, с одноосным и двухосным трекерами), использующих ОТММ- и ШИМ-контроллеры. В частности, применение ОТММ-контроллера в одноосной системе позволяет повысить эффективность преобразования энергии на 9,4 % и 10,9 % по сравнению с аналогичной системой, использующей ШИМ-контроллер. Согласно данным рисунка 3(б),

двухосная система с ОТММ-контроллером демонстрирует более высокую эффективность – на 10,3 % и 14,2 % по сравнению с системой на основе ШИМ. На рисунке также представлены результаты для фиксированной солнечной панели: использование ОТММ-контроллера повышает выходную мощность на 9,5 % и 16,5 % по сравнению с ШИМ-контроллером.

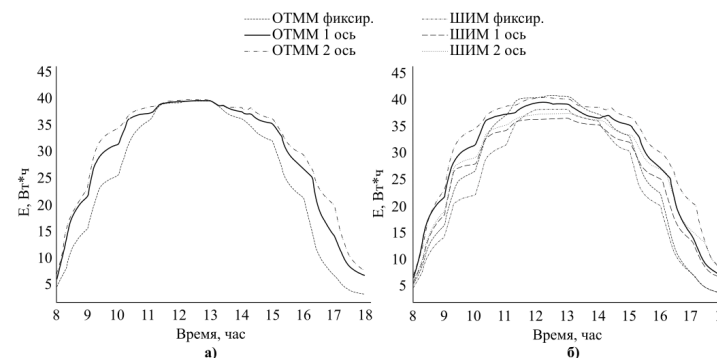


Рисунок 3 – Сравнительные графики выходной мощности фотоэлектрических систем с различной конфигурацией при использовании контроллеров ОТММ и ШИМ

Таким образом, вне зависимости от типа установки (стационарная или с трекерами), применение контроллера с функцией отслеживания точки максимальной мощности обеспечивает значительное улучшение энергетических характеристик по сравнению с контроллерами на основе широтно-импульсной модуляции.

Для проведения статистического анализа экспериментальных данных была оценена эффективность преобразования энергии при использовании различных типов контроллеров в течение дня (рисунок 4). Наивысший коэффициент преобразования мощности показал контроллер с функцией отслеживания точки максимальной мощности (ОТММ), достигнув значения 96%. В то же время максимальная эффективность преобразования при использовании контроллера с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) не превышала 90 %. Минимальные значения эффективности составляли 80 % для ОТММ-контроллера и 70% для ШИМ-контроллера.

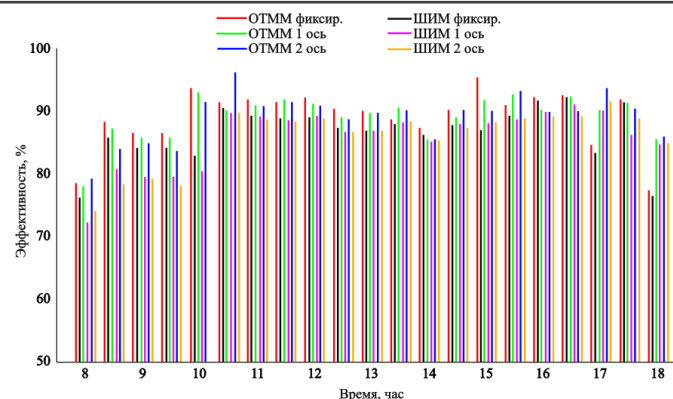


Рисунок 4 – Суточная эффективность контроллеров ОТММ и ШИМ

На рисунке 5 представлена эмпирическая функция распределения для каждой конфигурации фотоэлектрической системы в сочетании с соответствующими контроллерами.

Результаты статистического анализа показывают, что для фиксированной фотоэлектрической системы средняя эффективность преобразования энергии при использовании ШИМ-контроллера составила 87,9 % при стандартном отклонении 4,022 и средней ошибке 0,8776. Значения p по критериям Стьюдента ($p = 0,20$) и Колмогорова-Смирнова ($p = 0,1963$) превышают уровень значимости 0,05, что указывает на отсутствие статистически значимых различий между данными. При этом эффективность с ОТММ-контроллером составила 89,14 % при стандартном отклонении 4,556 и средней ошибке 0,9942, однако эта разница не является достоверной. Достоверность различий в данном случае оценивается в 60 %.

Для системы с одноосным солнечным трекером эффективность преобразования энергии с ШИМ-контроллером составила 86,24 % при стандартном отклонении 4,9398 и средней ошибке 1,0779. Значение p по t -критерию равно 0,01, а по критерию Колмогорова-Смирнова – 0,0410, что подтверждает наличие статистически значимых различий. Использование ОТММ-контроллера обеспечило более высокую эффективность на уровне 89,15 % при меньших разбросах значений: стандартное отклонение составило 3,4990, а средняя ошибка – 0,7635. Достоверность различий оценивается на уровне 90 %.

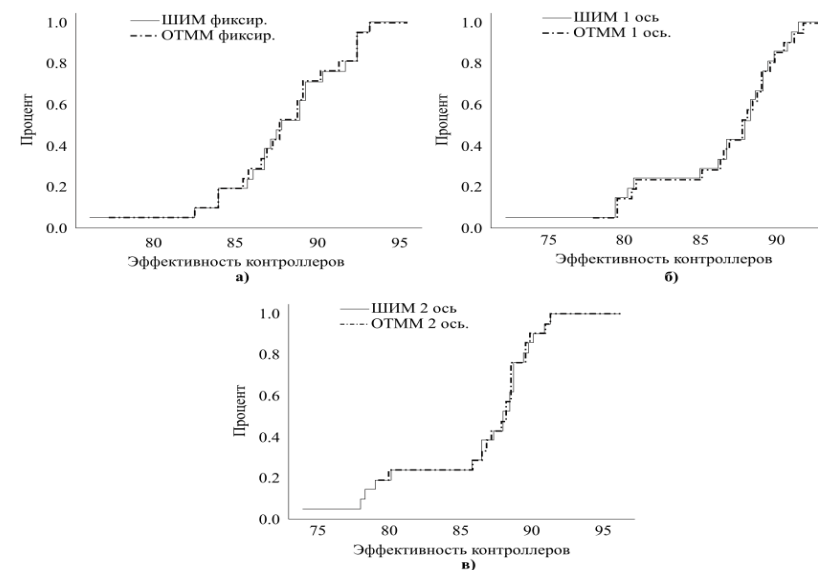


Рисунок 5 – Эмпирические функции распределения эффективности контроллеров для каждого типа фотоэлектрической системы

В случае двухосной системы ШИМ-контроллер обеспечил эффективность 86,17% при стандартном отклонении 4,9917 и средней ошибке 1,0892. Значения p по t -критерию (0,0025) и критерию Колмогорова-Смирнова (0,0159) указывают на наличие высокой статистической значимости. С ОТММ-контроллером эффективность увеличилась до 89,06 %, а стандартное отклонение и средняя ошибка составили 3,9194 и 0,8552 соответственно. Достоверность различий составила 95%.

Таким образом, наиболее значительное увеличение эффективности при переходе от ШИМ к ОТММ-контроллеру наблюдается в системах с трекерами, что подтверждается статистическим анализом. В фиксированной системе разница есть, но она не является статистически значимой.

Выводы

В ходе исследования была проведена сравнительная оценка эффективности контроллеров ОТММ и ШИМ в составе различных конфигураций фотоэлектрических систем. С использованием t -критерия Стьюдента и критерия Колмогорова-Смирнова было установлено, что для одноосных и двухосных солнечных трекеров ОТММ-контроллеры обеспечивают статистически значимое увеличение выходной мощности по

сравнению с ШИМ. В то же время, для фиксированных панелей существенной разницы в эффективности не наблюдается. Таким образом, для стационарных систем целесообразно применение более доступных ШИМ-контроллеров, тогда как для систем с трекерами предпочтительнее использование ОТММ-контроллеров для повышений выработки энергии.

Благодарность. Работа выполнена при поддержке исследовательского проекта BR28713563 Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан и выполнена в Казахском Национальном Университете имени аль-Фараби, что с благодарностью признано авторами.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Foley, A., Olabi, A. G.** Renewable energy technology developments, trends and policy implications that can underpin the drive for global climate change // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2017. – Vol. 68. – P. 1112–1114. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.065>

2 **Ibati, A. G.** 100 % sustainable energy //Energy. – 2014. – Vol. 77. – P. 1-5. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.10.083>

3 **Seme, S. et al.** Dual-axis photovoltaic tracking system–Design and experimental investigation //Energy. – 2017. – Vol. 139. – P. 1267–1274. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.05.153>

4 **Khamooshi, M. et al.** A review of solar photovoltaic concentrators // International Journal of Photoenergy. – 2014. – №. 1. – P. 958521. <https://doi.org/10.1155/2014/958521>

5 **Sidek, M. H. M. et al.** Automated positioning dual-axis solar tracking system with precision elevation and azimuth angle control //Energy. – 2017. – Vol. 124. – P. 160–170. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.02.001>

6 **Njoku, H. O.** Upper-limit solar photovoltaic power generation: Estimates for 2-axis tracking collectors in Nigeria //Energy. – 2016. – Vol. 95. – P. 504-516. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.11.078>

7 **Yilmaz, U., Turksoy, O., Teke, A.** Improved MPPT method to increase accuracy and speed in photovoltaic systems under variable atmospheric conditions //International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – 2019. – Vol. 113. – P. 634-651. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.05.074>

8 **Lazaroiu, G. C. et al.** Comparative analysis of fixed and sun tracking low power PV systems considering energy consumption //Energy Conversion and Management. – 2015. – Vol. 92. – P. 143–148. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.12.046>

9 **Seyedmahmoudian, M. et al.** State of the art artificial intelligence-based MPPT techniques for mitigating partial shading effects on PV systems–A review

//Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2016. – Vol 64. – P. 435–455. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.06.053>

10 **Kulaksiz, A. A., Akkaya, R.** Training data optimization for ANNs using genetic algorithms to enhance MPPT efficiency of a stand-alone PV system // Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences. – 2012. – Vol. 20. – № 2. – P. 241-254. DOI: 10.3906/elk-1101-1051

11 **Asowata, O. et al.** Optimizing the output power of a stationary PV panel //Proceedings of the Southern Africa Telecommunications Networks and Applications Conference (SATNAC), Stellenbosch, South Africa. – 2013.

Поступило в редакцию 07.03.25

Поступило с исправлениями 04.07.25

Принято в печать 05.09.25

* *Н. Б. Құттыбай¹, Д. К. Сыбанбаева², С. О. Орынбасар³,*

А. А. Каппарова⁴, А. Б. Болатбек⁵

^{1,2,3,4,5}әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық университеті,

Қазақстан Республикасы, Алматы қ.

07.03.25 ж. баспаға түсті.

04.07.25 ж. түзетулерімен түсті.

05.09.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

ФОТОЭЛЕКТРЛІК ЖҮЙЕЛЕРДІҢ ШЫҒЫС ҚҰАТЫНА ӘРТҮРЛІ КОНТРОЛЛЕРДІҢ ӘСЕРІН ЗЕРТТЕУ

Мақалада фотоэлектрлік қондырғылардың әртүрлі конфигурацияларына қатысты екі түрлі контроллердің, максималды қуат нүктесін бақылау (МҚНБ) жүйелері мен ендік импульстік модуляцияға (ЕИМ) негізделген контроллерлердің өнімділігіне салыстырмалы баға беріледі. Талдау стационарлық күн панельдерін, сондай-ақ күн қозғалысын бір осьті және екі осьті бақылау механизмдерімен жабдықталған жүйелерді қамтиды. Зерттеудің мақсаты – қымбат МҚНБ-контроллерлерін қолжетімді ЕИМ-контроллерлермен алмастыру жалпы энергетикалық тиімділікке айтарлықтай әсер етпейтін жағдайларда орынды болуы мүмкін деген гипотезаны тексеру. Контроллерлердің жұмысындағы айырмашылықтарды бағалау үшін статистикалық әдістер: Стьюдент критерийі мен Колмогоров–Смирнов критерийі қолданылды. Нәтижелер көрсеткендей, стационарлық фотоэлектрлік жүйелер жағдайында контроллерлер арасындағы тиімділік

айырмашылықтары статистикалық тұрғыдан маңызсыз ($p > 0.05$), бұл өнімділікке зиян келтірмей, күрделі шығындарды азайтуға мүмкіндік бар екенін білдіреді. Алайда трекерлермен жабдықталған жүйелерде МҚНБ-контроллерлердің тиімділігі едәуір жоғары болып шықты, бұл p мәндерінің төмен болуымен ($p < 0.05$) расталды және сенімді айырмашылықтарды көрсетеді. Осылайша, қандай контроллер түрін қолданудың орынды екендігі жүйе архитектурасына байланысты екені анықталды. Егер стационарлық жүйелерде қарапайым ЕИМ-контроллерлерді қолдануға тиімді болса, трекерлерде оларды пайдалану энергия өндірісінің төмендеуіне әкеледі. Алынған қорытындылар күн энергетикалық қондырғыларын жобалау мен оңтайландыруда «шығын – тиімділік» арақатынасын ескере отырып, практикалық маңызға ие.

Кілтті сөздер: фотоэлектрлік қондырғылар, МҚНБ-контроллер, ЕИМ-контроллер, статистикалық талдау, энергетикалық тиімділік.

*N. B. Kuttybay¹, D. K. Sybanbayeva², S. O. Orynassar³,

A. A. Kapparova⁴, A. B. Bolatbek⁵

^{1,2,3,4,5}al-Farabi Kazakh National University, Republic of Kazakhstan, Almaty

Received 07.03.25

Received in revised form 04.07.25

Accepted for publication 05.09.25

INVESTIGATION OF THE IMPACT OF CONTROLLER TYPES ON THE OUTPUT POWER OF PHOTOVOLTAIC SYSTEMS

The article presents a comparative assessment of the performance of two types of controllers: Maximum Power Point Tracking (MPPT) systems and Pulse-Width Modulation (PWM)-based controllers, in relation to various configurations of photovoltaic (PV) systems. The analysis covers both fixed solar panels and systems equipped with single-axis and dual-axis solar tracking mechanisms. The aim of the study was to test the hypothesis that replacing costly MPPT controllers with more affordable PWM controllers may be justified if the impact on overall energy efficiency is minimal. To evaluate the performance differences between the controllers, statistical methods were employed, including the Student's t -test and the Kolmogorov–Smirnov test. The results showed that in fixed PV systems, there were no statistically significant differences in efficiency between the controllers ($p > 0.05$ for both tests), suggesting the potential for reducing capital costs without compromising performance. However, in tracking

systems, MPPT controllers demonstrated significantly higher efficiency, as evidenced by low p -values ($p < 0.05$), indicating meaningful differences. Therefore, it was established that the suitability of a given type of controller depends on the system architecture. While simpler PWM controllers may be acceptable for fixed installations, their use in tracking systems leads to energy yield losses. The findings have practical implications for the design and optimization of solar energy systems, taking into account the cost-to-efficiency ratio.

Keywords: photovoltaic systems, MPPT controller, PWM controller, statistical analysis, energy efficiency.

<https://doi.org/10.48081/UUCO9792>

**С. А. Мендыбаев¹, *Д. С. Нарынбаев², А. Е. Анарбаев³,
Н. А. Дубинец⁴, Б. Т. Абдрахманов⁵,**

¹С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Қазақстан Республикасы, Астана қ.

²KAZENERGY қауымдастығы, Қазақстан Республикасы, Астана қ.;
^{3,4,5}Торайғыров университеті, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.

¹ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-8221-4802>

²ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-9705-3420>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6890-8005>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-2186-1930>

⁵ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-7817-1275>

*e-mail: d.narynbayev@gmail.com

КОМПРЕССОРЛЫҚ СТАНЦИЯНЫҢ АВТОМАТТАНДЫРЫЛҒАН БАСҚАРУ ЖҮЙЕСІНІҢ МАТЕМАТИКАЛЫҚ МОДЕЛІН ӘЗІРЛЕУ

Қазіргі заманғы өндіріс күрделі және автоматтандырылған басқаруды қажет етеді, өйткені ескірген әдістер енді тиімді болмайды. Үнемі өсіп келе жатқан өнімділік пен сапа талаптары жағдайында озық басқару жүйелерін енгізу өте маңызды болып табылады. Өнеркәсіптік нысандардың, соның ішінде ғимараттардың, жабдықтардың және технологиялық желілердің сенімді және өнімді жұмысын қамтамасыз ету үшін арнайы басқару жүйесі қажет. Автоматтандырылған басқару жүйелерінің негізінде объектінің оңтайлы алгоритмін анықтайтын математикалық модель жатыр. Бұл алгоритм өндіріс процесінің мақсаттарына жету үшін қойылған міндеттерге байланысты Басқару әсерлерін реттейді.

Бұл жұмыс ауаны қысу және беру процесін автоматтандырылған басқаруға арналған математикалық модельді ұсынады. Статикалық және астатикалық кешіктірілген мінез-құлық, статикалық сипаттама және динамиканы анықтайтын параметрлер сияқты басқарылатын объектінің сипаттамалары талданады. Беріліс функциясы мен беріліс коэффициентін қамтитын ұсынылған математикалық модель компрессорлық станцияның сенімділігі

мен тиімділігін бағалауға және оңтайландыруға мүмкіндік береді. Беру функциясын зерттеу компрессорлық станцияны басқару объектісі үшін жүргізілді, оның негізгі сипаттамалары анықталды, аналитикалық формальды басқару моделі жасалды және эмпирикалық эксперименттік үдеу қисығы орындалды. Зерттеу нәтижелері дамыған математикалық модельдің өнеркәсіптік объектінің сенімділігі мен тиімділігін арттыруға қалай ықпал ететінін көрсетеді.

Кілтті сөздер: Автоматтандырылған басқару жүйесі, математикалық модель, динамикалық өнімділік, компрессорлық станция, беру функциясы

Кіріспе

Электр энергетикасында компрессорлық станциялар нақты мәселелерді шешу үшін бөлек, қатаң белгіленген жерлерде қолданылады. Олар қажет қолдау үшін оңтайлы қысымды ауаны салқындату жүйелерінде генераторлық және турбиналық жабдықтарды қамтамасыз ету үшін жану газ турбиналарында, сондай-ақ жұмыс істеу үшін пневматикалық басқару жүйелерін және автоматика. [1]

Электр энергетикасындағы әртүрлі жүйелердің тиімділігі мен қауіпсіздігі компрессорлық станцияларды қамтамасыз етуге, демек, электр станцияларының өнімділігі мен энергия тиімділігін арттыруға көмектеседі. [2]

Математикалық модельдеу әдістері технологиялық процестермен автоматтандырылған жүйелерді талдау және синтездеу кезінде қолданылады. Атап айтқанда, идеалды компрессорлық станция мысалында біз технологиялық динамикалық процестерді мұқият қарау үшін математикалық модель жасаймыз. [3]

Басқару объектісінің математикалық моделін жасау тиімді басқару жүйесін жобалаудың маңызды кезеңі болып табылады. Бұл процестің негізгі мақсаты-объектінің құрылымын анықтау және оның статикалық және динамикалық сипаттамаларын анықтау. [4]

Жүйені математикалық модельдеу оны жеке компоненттерге бөлуден және олардың қасиеттерін сипаттаудан басталады. Бұл сипаттаманы компоненттің кіріс және шығыс параметрлері арасындағы байланысты орнататын аналитикалық теңдеулер түрінде немесе сол байланысты бейнелейтін графиктер түрінде ұсынуға болады. [5]

Материалдар мен әдістері

Қаралып отырған ауаны сығымдау және айдау технологиялық процесін автоматты басқару жүйесінде мыналарды жүзеге асыру қажет: тұтынушыларға

түсетін ауа қысымын реттеу, машинаны қажетсіз режимдерден қорғау, сондай-ақ майлау майының температурасын реттеу. [6]

Агрегатқа кіретін ауа ағынының кинетикалық энергиясы (1) формула бойынша

$$E_{\text{кин}} = \frac{mV^2}{2} \quad (1)$$

мұндағы $E_{\text{кин}}$ – ауа ағынының кинетикалық энергиясы, Дж; m – ауа массасы, кг; v – ауа ағынының жылдамдығы, м/с. [7]

Егер m массасының орнына ауаның массалық тығыздығын ρ , кг/м³ алмастыратын болсақ, онда біз (2) формуласын аламыз, ауаның динамикалық қысымын немесе жылдамдық ағынын q , кгс/м² табамыз

$$q = \frac{\rho V^2}{2} \quad (2)$$

Дроссельдің ашылуы компрессорға түсетін ауаның массалық тығыздығын тікелей анықтайды. Бұл өз кезегінде компрессор тудыратын соңғы қысымға әсер етеді. Басқару объектісінің статикалық сипаттамасы Шығыс қысымы мен дроссельдің тұрақты күйдегі орны арасындағы байланысты сипаттайды.

Статикалық сипаттамалар сызықтық (әр түрлі көлбеу бұрышы бар) немесе сызықтық емес болуы мүмкін. Көптеген нақты жүйелерде сызықтық емес сипаттамалар байқалады. [7]

Бұл параметрлер кіріс деректерінің объектінің Шығыс сипаттамаларына қаншалықты әсер ететінін анықтауға мүмкіндік береді. Статикалық сипаттамалар есептеулер немесе эксперименттік зерттеулер арқылы белгіленеді.

Басқару объектісінің динамикалық сипаттамасы оның шығыс сигналы өтпелі режим процесінде кіріс сигналының өзгеруіне қалай жауап беретінін сипаттайды. Объектінің әртүрлі бұзылуларға реакциясы әртүрлі болуы мүмкін болғандықтан, оның динамикасын зерттеу үшін стандартты сынақ әсерлері қолданылады. Ең кең таралған және оңай алынатын көрсеткіштердің бірі-кіріс сигналының күрт өзгеруіне (қадамдық әсер) жауап ретінде шығыс сигналының уақыт бойынша қалай өзгеретінін көрсететін үдеу қисығы. [7]

Үдеткіш қисығы басқару объектісінің динамикалық сипаттамаларын бағалауға мүмкіндік береді, атап айтқанда:

а) кідіріс (τ): кідірісті анықтау үшін шығыс сигналының өзгеру жылдамдығы максималды болатын нүктеде үдеу қисығына тангенс салу керек. Осы тангенсті шығыс сигналының бастапқы белгіленген мәніне сәйкес

келетін көлденең сызықпен қиылысқанға дейін жалғастыра отырып, біз қиылысу нүктесін аламыз. Мазасыздық енгізілген сәттен бастап осы қиылысу нүктесіне дейінгі уақыт аралығы Объектінің жалпы кешігуі болып табылады.

б) уақыт константасы (Тоб): уақыт константасы бастапқы тұрақты мән сызығымен тангенстің қиылысу нүктесі (жоғарыда сипатталғандай салынған) мен оның шығу сигналының жаңа тұрақты мәнінің сызығымен қиылысу нүктесі арасындағы уақыт аралығы ретінде анықталады.

в) берілу коэффициенті: статикалық объектілер үшін берілу коэффициенті объектінің бастапқы тұрақты күйден жаңасына ауысқан кезде шығыс сигналының кірудегі бірлік бұзылуына жауап ретінде қаншалықты өзгеретінін көрсетеді. Басқаша айтқанда, бұл шығыс сигналының өзгеруінің тұрақты режимдегі бір кіріс әсерінің шамасына қатынасы.

Алынған деректерді пайдалана отырып, объектінің беру функциясын есептеңіз [7]. Нақтырақ айтқанда, басқару объектісі $Wob(s)$ беру функциясымен сипатталатын қарапайым статикалық кешігу жүйесі ретінде ұсынылуы мүмкін.

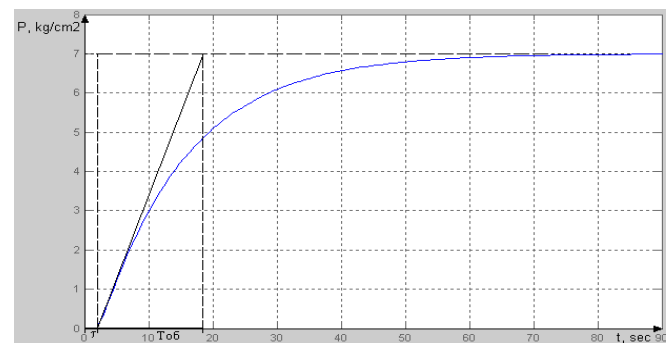
$$W_{об}(s) = k_{об} e^{-\tau s} / (T_{об} s + 1), \quad (3)$$

немесе ең қарапайым статикалық объект

$$W_{об}(s) = k_{об} e^{-\tau s} / s, \quad (4)$$

мұндағы $k_{об}$ – объектінің берілу коэффициенті; τ – кешігу уақыты; Тоб – объектінің уақыт константасы.

Басқару объектісінің беріліс функциясын табу үшін эмпирикалық түрде алынған үдеу қисығы қолданылады (Сурет 1). [2]



Сурет 1 – Басқару объектісінің үдеу қисығы

1-суретте өтпелі кезең 16,5 с-қа тең Тоб уақытының тұрақтысымен және 2 с-қа тең тоб–тың кешігу уақытымен сипатталатыны көрсетілген.

Басқару объектісінің берілу коэффициенті (коб) бастапқы стационарлық Күйден Жаңа стационарлық күйге ауысу кезінде туындайтын объектінің Шығыс айнымалысының өзгеруінің реттеуші органның позициясының өзгеру шамасына қатынасын сипаттайды. [8]

(3) формула бойынша коб беру коэффициентін табамыз.

$$k_{об} = \frac{x(\infty) - x_0}{\Delta x}, \quad (5)$$

мұндағы $x(\infty)$ – объектінің тұрақты күйі; x_0 –объектінің бастапқы күйі; Δx –реттеуші органның қозғалысы.

(5) формуласына сәйкес мәндерді ауыстыра отырып, біз аламыз

$$k_{об} = \frac{7-0}{1} = 7 \frac{\text{кгс/м}^2}{\%}$$

Ақыр соңында басқару объектісінің беріліс функциясы келесідей болады

$$W_{об}(s) = \frac{7e^{-2s}}{16.5s+1}$$

Айналымдағы майдың температурасын реттеу жүйесі турбокомпрессорға берілетін майдың қажетті температураға ие болуын қамтамасыз етеді. [9]

Бұл параметр реттеу үшін таңдалады, өйткені ол турбокомпрессорды қажетті тұтқырлықпен маймен қамтамасыз етуге тікелей әсер етеді. Турбокомпрессор реттеу объектісі ретінде емес, майды тұтынушы ретінде қарастырылады. Сондықтан турбокомпрессор ішіндегі жылу процестері реттелетін май параметріне тікелей әсер етпейді.

Турбокомпрессорға түсетін майдың температуралық режимі майлау жүйесінде «май-салқындатқыш» жылу алмастырғышының көмегімен реттеледі. Бұл жылу алмастырғыш турбокомпрессорға кіре берісте берілген температураны сақтай отырып, май алатын және беретін жылу энергиясы арасындағы тепе-теңдікті қамтамасыз етеді.

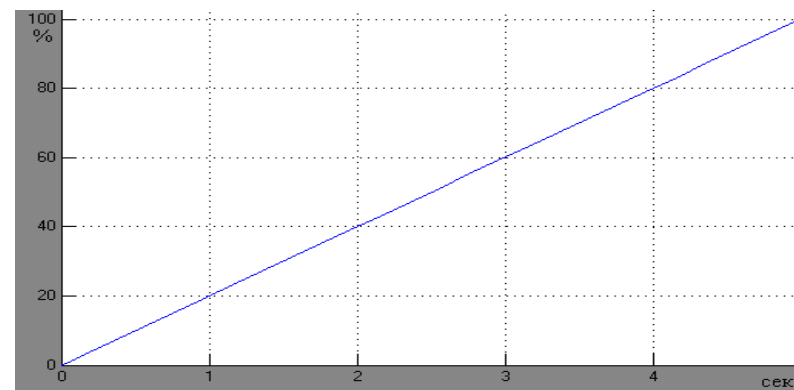
Жылу алмастырғышқа жеткізілетін судың мөлшері, демек, майдың салқындату қарқындылығы тиісті реттеуші органның ашылу дәрежесімен анықталады.

Біз қарастыратын автоматты басқару жүйесіндегі реттеуші орган өзін-өзі теңестірмейтін объект болып табылады және интеграциялық буынмен ұсынылған. Интегралдау буынының беріліс функциясы жалпы формада болады

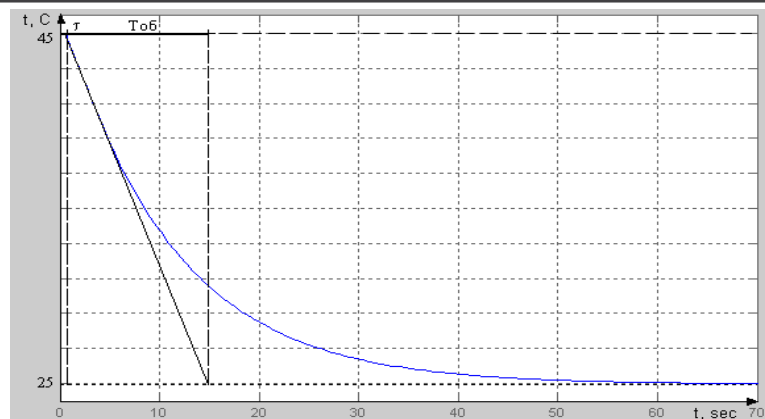
$$W_{и}(s) = \frac{k_p}{s}. \quad (6)$$

Реттеуші органның беріліс функциясы үдеу қисығымен анықталады (2-сурет).

3-суреттегі графиктен реттеуші органның 100-ге тең кіріктіру коэффициенті және 5 С-қа тең интегралдау уақытының тұрақтысы бар интегралдау буыны ұсынылғанын көруге болады.



2-сурет – Реттеуші органның үдеу қисығы



3-сурет – Басқару объектісінің үдеу қисығы.

Нәтижелер және талқылау

Осылайша, реттеуші органның берілу функциясы келесідей болады

$$W_{po}(s) = \frac{100}{5s} = \frac{20}{s}. \quad (7)$$

Басқару объектісінің эксперименттік үдеу қисығы 3-суретте көрсетілген. 3-суреттен өтпелі уақыттың тұрақтысын анықтаймыз $T_{об} = 14$ с, сондай-ақ кешігу уақыты $t_{об} = 2$ с.

Коэффициент передачи (коб) объекта управления характеризует отношение изменения выходной переменной объекта в установившемся режиме к величине изменения управляющего воздействия. [10]

Басқару объектісінің берілу коэффициенті (коб) объектінің тұрақты режимдегі Шығыс айнымалысының өзгеруінің басқару әсерінің өзгеру мәніне қатынасын сипаттайды. [10]

(6) формуласына сәйкес мәндерді ауыстыра отырып, біз аламыз

$$k_{об} = \frac{25-45}{1} = -20 \frac{^{\circ}\text{C}}{\%}$$

Ақыр соңында басқару объектісінің беріліс функциясы келесідей болады

$$W_{об}(s) = \frac{-20e^{-ls}}{14s+1}.$$

Қорытынды

Осылайша, ауаны сығымдау және айдау технологиялық процесін автоматты басқару жүйесі тұтынушыларға келетін ауа қысымын реттеуді, машинаны қажетсіз режимдерден қорғауды, сондай-ақ майлау майының температурасын реттеуді математикалық түрде сипаттайды.

Компрессорлық станцияны басқарудың автоматтандырылған жүйесі үшін жасалған математикалық модель өнеркәсіптік қондырғының сенімді және тиімді жұмысына ықпал етеді.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

1 Hubka, V. Theory of Technical Systems [Теория технических систем], A Total Concept Theory for Engineering Design / Vladimir Hubka, Ernst Wolfgang Eder. – Springer Verlag, 1988. – 275 p.

2 Микеров, А. Г. Проблема устойчивости первых регуляторов. А. Г. Микеров // Control Engineering Россия. – 2014. № 4(52). – С. 94–96 – URL: https://www.researchgate.net/publication/281270255_Problema_ustojcivosti_pervyh_regulirov (Дата обращения: 17.04.2024)

3 Blume, Steven Warren, Electric Power System Basics for the Nonelectrical Professional (IEEE Press Series on Power and Energy Systems) / Steven Warren Blume. – 2nd Edition. – Wiley-IEEE Press, 2016. – 256 P. ISBN-10 : 1119180198, ISBN-13 : 978-1119180197 – URL: <https://www.aimspress.com/article/doi/10.3934/mmc.2024010?viewType=HTML> (on 16 April 2024)

4 Some novel results for DNNs via relaxed Lyapunov functionals[J] / Guoyi Li, Jun Wang, Kaibo Shi, Yiqian Tang // Mathematical Modelling and Control. – 2024. – № 4(1): – P. 110-118. doi: 10.3934/mmc.2024010. – URL: <https://www.aimspress.com/article/doi/10.3934/mmc.2024010?viewType=HTML> (on 16 April 2024)

5 Maxwell, James Clerk. On Governors. The Proceedings of the Royal Society. 1868. 100. – 270-283 p. – URL: <https://royalsocietypublishing.org/> (on 16 April 2024)

6 Микеров, А. Г., Классики линейной теории автоматического регулирования / А. Г. Микеров // Control Engineering Россия. – 2014. № 5(53). – С. 76-79 – URL: https://www.researchgate.net/publication/281270532_Klassiki_linejnoj_teorii_avtomaticheskogo_regulirovania (дата обращения: 17.04.2024)

7 Воронов, А. А. Теория автоматического управления: учебник для вузов по специальности «Автоматика и телемеханика». В 2-х ч. Ч. 1. Теория линейных систем автоматического управления / Н. А. Бабаков, А. А. Воронов,

А. А. Воронова, – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Высшая школа, 1986. – 367 с., ил.

8 Наладка средств измерений и систем технологического контроля: справочное пособие / А. С. Ключев, Л. М. Инн, Е. И. Коломиец, С. А. Ключев. – 2-е изд., перераб. и доп. Москва : Энергоатомиздат, 1990. – 400 с.

9 Техника чтения схем АСУ и технологического контроля / А. С. Ключев, Б. В. Глазов, М. Б. Миндин, С. А. Ключев. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва : Энергоатомиздат, 1991. – 432 с.: ил.

10 Волкевич, Л. И. Автоматизация производственных процессов : учебное пособие / Л. И. Волкевич, М. П. Коваль. – 2-е изд., стер. – Москва : Машиностроение, 2007. – 380 с.: ил.

REFERENCES

1 Hubka, V. Theory of Technical Systems. A Total Concept Theory for Engineering Design / Vladimír Hubka, Ernst Wolfgang Eder. – Springer Verlag, 1988. – 275 p.

2 Mikerov, A. G. Problema ustojchivosti pervyh regulyatorov. [The problem of stability of the first regulators] / A. G. Mikerov // Control Engineering Russia. – 2014. № 4(52). – p. 94-96 – URL: https://www.researchgate.net/publication/281270255_Problema_ustojchivosti_pervyh_regulatorov (дата обращения: 17.04.2024)

3 Blume, Steven Warren Electric Power System Basics for the Nonelectrical Professional (IEEE Press Series on Power and Energy Systems) / Steven Warren Blume. – 2nd Edition. – Wiley-IEEE Press. – 2016. – 256 p. ISBN-10 : 1119180198, ISBN-13 : 978-1119180197 – URL: <https://www.aimspress.com/article/doi/10.3934/mmc.2024010?viewType=HTML> (on 16 April 2024)

4 Some novel results for DNNs via relaxed Lyapunov functionals[J] / Guoyi Li, Jun Wang, Kaibo Shi, Yiqian Tang // Mathematical Modelling and Control. – 2024. – № 4(1): – p. 110-118. doi: 10.3934/mmc.2024010. – URL: <https://www.aimspress.com/article/doi/10.3934/mmc.2024010?viewType=HTML> (on 16 April 2024)

5 Maxwell, James Clerk On Governors. The Proceedings of the Royal Society. 1868. 100. – p. 270-283– URL: <https://royalsocietypublishing.org/> (on 16 April 2024)

6 Mikerov, A. G. Klassiki linejnoy teorii avtomaticheskogo regulirovaniya [Classics of the linear theory of automatic control] / A. G. Mikerov // Control Engineering Russia. – 2014. № 5(53). – p. 76-79 – URL: https://www.researchgate.net/publication/281270532_Klassiki_linejnoy_teorii_avtomaticheskogo_regulirovaniya (Дата обращения: 17.04.2024)

7 Voronov, A. A. Teoriya avtomaticheskogo upravleniya: uchebnyk dlya vuzov po special'nosti «Avtomatika i telemekhanika». [Theory of automatic control: a textbook for universities specializing in «Automation and Remote Control»] / V 2-h ch. Ch. 1. Teoriya linejnyh sistem avtomaticheskogo upravleniya [Theory of linear automatic control systems] / N. A. Babakov, A. A. Voronov, A. A. Voronova, – 2-е изд., pererab. i dop. – Moskva : Vysshaya shkola, 1986. – 367 P., il.

8 Naladka sredstv izmerenij i sistem tehnologicheskogo kontrolya: spravochnoe posobie [Adjustment of measuring instruments and process control systems] / A. S. Klyuev, L. M. Inn, E. I. Kolomiech, S. A. Klyuev. – 2-е изд., pererab. i dop. Moskva : Energoatomizdat, 1990. – 400 p.

9 Tehnika chteniya shem ASU i tehnologicheskogo kontrolya [Technique for reading automated control system diagrams and process control] / A. S. Klyuev, B. V. Glazov, M. B. Mindin, S. A. Klyuev. – 3-е изд., pererab. i dop. – Moskva : Energoatomizdat, 1991. – 432 p.: il.

10 Volkevich, L. I. Avtomatizaciya proizvodstvennyh processov : uchebnoe posobie [Automation of production processes] / L. I. Volkevich, M. P. Koval'. – 2-е изд., ster. – Moskva : Mashinostroenie, 2007. – 380 p.: il.

10.07.25 ж. баспаға түсті.

18.07.25 ж. түзетулерімен түсті.

05.09.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

С. А. Мендыбаев¹, *Д. С. Нарынбаев², А. Е. Анарбаев³,
Н. А. Дубинец⁴, Б. Т. Абдрахманов⁵,

¹Казахский агротехнический исследовательский университет имени
С. Сейфуллина, Республика Казахстан, г. Астана

²Ассоциация KAZENERGY, Республика Казахстан, г. Астана

^{3,4,5}Торайғыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар

Поступило в редакцию 10.07.25

Поступило с исправлениями 18.07.25

Принято в печать 05.09.25

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ КОМПРЕССОРНОЙ СТАНЦИИ

Современное производство требует сложного и автоматизированного управления, так как устаревшие методы больше не эффективны. В условиях постоянно растущих требований к производительности и качеству, внедрение передовых систем

управления становится критически важным. Для обеспечения надежной и продуктивной работы промышленных объектов, включая здания, оборудование и технологические линии, необходима специализированная система управления. В основе автоматизированных систем управления лежит математическая модель, которая определяет оптимальный алгоритм работы объекта. Этот алгоритм регулирует управляющие воздействия в зависимости от поставленных задач, чтобы достичь целей производственного процесса.

В данной работе представлена математическая модель для автоматизированного управления процессом сжатия и подачи воздуха. Анализируются характеристики управляемого объекта, такие как статическое и астатическое поведение с запаздыванием, статическая характеристика и параметры, определяющие динамику. Предложенная математическая модель, включающая передаточную функцию и коэффициент передачи, позволяет оценить и оптимизировать надежность и эффективность работы компрессорной станции. Исследования передаточной функции проведены для объекта управления компрессорной станции, определены его основные характеристики, составлена аналитическая формальная модель управления и выполнена эмпирически экспериментальная кривая разгона. Результаты исследования демонстрируют, как разработанная математическая модель способствует повышению надежности и эффективности функционирования промышленного объекта.

Ключевые слова: Автоматизированная система управления, Математическая модель, Динамические характеристики, Компрессорная станция, Передаточная функция

S. A. Mendybaev¹, *D. S. Narynbayev², A. Ye. Anarbayev³, N. A. Dubinets⁴, B. T. Abdrakhmanov⁵,

¹Kazakh Agrotechnical Research University named after S. Seifullin, Republic of Kazakhstan, Astana

²Association KAZENERGY, Republic of Kazakhstan, Astana

^{3,4,5}Toraigyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar

Received 10.07.25

Received in revised form 18.07.25

Accepted for publication 05.09.25

DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL AUTOMATED CONTROL SYSTEM COMPRESSOR STATION

Modern production requires complex and automated management, as outdated methods are no longer effective. With ever-increasing demands on productivity and quality, the implementation of advanced management systems is becoming critically important. A specialized management system is needed to ensure reliable and productive operation of industrial facilities, including buildings, equipment, and production lines. Automated control systems are based on a mathematical model that determines the optimal algorithm for the operation of an object. This algorithm adjusts the control actions depending on the tasks set in order to achieve the goals of the production process.

This paper presents a mathematical model for automated control of the compression and air supply process. The characteristics of the controlled object are analyzed, such as static and delayed astatic behavior; static characteristics, and parameters that determine dynamics. The proposed mathematical model, including the transfer function and transmission coefficient, makes it possible to evaluate and optimize the reliability and efficiency of the compressor station. Studies of the transfer function have been carried out for the compressor station control object, its main characteristics have been determined, an analytical formal control model has been compiled, and an empirically experimental acceleration curve has been performed. The results of the study demonstrate how the developed mathematical model contributes to improving the reliability and efficiency of an industrial facility.

Keywords: Automated control system, Mathematical model, Dynamic characteristics, Compressor station, Transfer function

<https://doi.org/10.48081/YJWT7001>

**Е. Г. Нешина¹, А. Д. Мехтеев², Н. Б. Калиаскаров^{3*},
А. Д. Алькина⁴, Д. Т. Мукашева⁵**

^{1,2,3,4}«Карагандинский Технический Университет имени Абылкаса

Сагинова, Республика Казахстан, г. Караганда;

⁵РГП Казахстанский институт метрологии,

Республика Казахстан г. Астана

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8973-2958>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2633-3976>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3684-1488>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4879-0593>

⁵ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-9064-2711>

*e-mail: n.kaliaskarov@ktu.edu.kz

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЕРЕДАЧИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МОЩНОСТИ ПО ОПТИЧЕСКОМУ ВОЛОКНУ

В данной статье представлена разработка и экспериментальная проверка системы передачи энергии по одному оптоволоконному каналу. Одним из наиболее перспективных решений является технология Power-over-Fiber (PoF), предполагающая использование волоконно-оптических линий как для транспортировки энергии, так и для информационного обмена. Описана архитектура лабораторного стенда, включающего полупроводниковые лазеры, оптоволоконную линию стандарта G.651 и фотоприёмник с нагрузкой. Проведены измерения электрических и тепловых параметров системы при различных режимах работы. Экспериментально подтверждена возможность эффективной передачи электрической мощности до 0,08 Вт с достижением коэффициента полезного действия на уровне 13,7%. Также рассмотрена схема совмещённой передачи энергии и информации на основе многоканальной оптической конфигурации. Работа демонстрирует практическую реализуемость концепции и перспективность её применения в телеметрических системах, автоматике. Обоснованы направления дальнейших исследований, включая повышение КПД, миниатюризацию компонентов и

интеграцию с существующими волоконно-оптическими сетями. Полученные результаты могут быть использованы при разработке энергонезависимых узлов, встроенных сенсоров, а также автономных устройств мониторинга в сложных или удалённых условиях эксплуатации, где недоступно традиционное электропитание и требуется высокая надёжность.

Ключевые слова: волоконно-оптическая передача энергии, Power-over-Fiber (PoF), оптоволоконные системы питания, фотоприёмник, волоконно-оптический датчик, электронные устройства, альтернативные источники энергии, фотовольтаика.

Введение

В контексте современного технологического прогресса границы между системами энергоснабжения и информационно-коммуникационными сетями неуклонно стираются. Возрастает потребность в интегрированных решениях, способных одновременно доставлять электрическую энергию и передавать данные удалённым устройствам и датчикам. Это особенно актуально для таких областей, как промышленная автоматизация, телекоммуникации и Интернет вещей (IoT), где эффективное объединение потоков энергии и информации становится ключевым фактором для создания интеллектуальных и автономных систем.

Традиционные подходы к электропитанию и связи удалённых устройств сталкиваются с рядом ограничений. Раздельная прокладка кабелей для питания и передачи данных усложняет инфраструктуру и повышает затраты, при этом протяжённые электрические линии питания подвержены потерям и электромагнитным помехам. Гибридные решения, такие как технология Power over Ethernet (подача низковольтного питания по витой паре вместе с данными), имеют ограниченную дальность (около 100 метров) и ограничены по мощности, которую можно безопасно передать. В условиях, требующих больших расстояний или мощности, такие методы оказываются недостаточными. Волоконно-оптические линии связи, в свою очередь, предоставляют огромную полосу пропускания и полную помехозащищённость, но стандартные оптоволоконные системы не предназначены для передачи значительной электрической энергии. Таким образом, передача энергетических параметров по волоконно-оптическому проводнику является крайне актуальным вопросом [1;2;3;4;5;6].

Одним из перспективных направлений, призванных решить эту задачу, является передача энергии по оптическому волокну (известная как Power-over-Fiber, PoF). В этой концепции высокоинтенсивное лазерное излучение подаётся через оптоволоконный проводник к удалённому узлу,

где фотоприёмник (фотоэлектрический преобразователь) преобразует свет обратно в электричество. Такой подход обеспечивает гальваническую развязку и устраняет проблемы электромагнитных помех, что привлекательно для питания датчиков в опасных или электромагнитно-нагруженных средах [7].

Практическая реализуемость передачи энергии по единственному оптоволоконному каналу значительно снижает сложность сенсорных сетей. Такая система будет особенно полезна при длительном удалённом мониторинге объектов (например, конструкций или высоковольтных установок), где применение традиционных источников питания затруднено: датчики получали энергию по волокну и параллельно передавали по нему же информацию на управляющий модуль [8].

Исходя из изложенного, настоящее исследование направлено на разработку передовой системы, способной передавать энергетические параметры по волоконно-оптическому проводнику.

Научная новизна работы заключается в создании лабораторного прототипа и в экспериментальной оценке его характеристик, прежде всего коэффициента полезного действия передачи энергии в реальных условиях. Разработан экспериментальный стенд, позволяющий измерить, насколько эффективно система доставляет электрическую мощность по волокну.

Материалы и методы

На рисунке 1 представлена структурная схема системы передачи энергии по оптическому волокну (ОВ). Используется стабилизированный источник постоянного тока 1, который подключен к через электрический проводник 2 четырем полупроводниковым лазерам 3. В опытах использованы четыре лазер мощностью 20 mW с отклонением в пределах $\pm 0,5 \text{ mW}$. Тип лазера InGaAs, Laser launcher level CLASS IIIB, 650 nm $\pm 10 \text{ nm}$, что соответствуют диапазону красного цвета. Все лазеры идентичны по своим техническим характеристикам. Для подключения лазера к волоконно-оптическому проводнику использованы оптические коннекторы типа SC, которые установлены с обоих концов волоконно-оптических проводника 5, с одной стороны по цифрой 4 обозначен входной коннектор, а с другой страны выходной коннектор 6. Волоконно-оптический проводник 5 служит для передачи энергии световой волны 7 падающей на поверхность фотоприемника 8. Энергия от источника излучения 2 передавалась по оптическому волокну стандарта G.651 с диаметрами сердцевины 50 мкм и оболочки 125 мкм. На поверхность фотоприемника 8 падало четыре световых пятна. Для измерения электрических параметров использовано два цифровых мультиметра 9 и 10. К фотоприёмнику была подключена электрическая нагрузка 11. Температура поверхности кремневой пластины до начала эксперимента 21 °C, после

окончания эксперимента 26 0C. Температура поверхности кремнёвой пластины была измерена при помощи инфракрасного пирометра Fluke 62 MAX с погрешностью измерения $\pm 1,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ [9;10].

Исходные параметры: напряжение питания лазеров 2,94 В, ток потребление одного лазера 0,28 А, соответственно общий ток потребления 1,12 А, полезная мощность лазера 20 mW. Напряжение фотоприемника 2,2 В ток потребления нагрузки 4,99 мА, мощность 0,011 Вт. Длина световой волны 650 нм.

Параметры фотоприемника напряжение 2,2 В сила тока 35 мА примерно около 0,08Вт. КПД передачи энергии 13,7%.

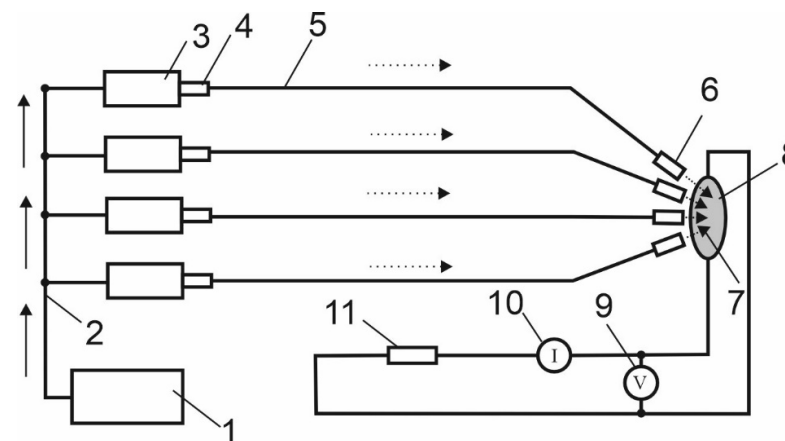


Рисунок 1 – Структурная схема системы передачи энергии по оптическому волокну

На рисунке 2 представлен лабораторный стенд, созданного для проведения экспериментов по передаче энергии через оптоволоконный кабель. Отображено размещение оборудования, подключение лазеров, волокна, фотоприёмника и измерительной аппаратуры.

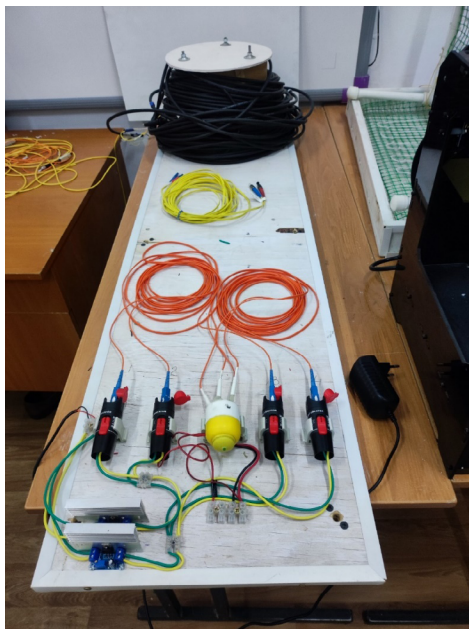


Рисунок 2 – Лабораторный стенд для передачи энергии по ОВ

Результаты и обсуждения

На рисунке 3 отображается график изменения выходной мощности фотоприёмника (Вт) в зависимости от количества одновременно работающих лазеров (от 1 до 4). Демонстрируется суммирующий эффект мощности излучения, передаваемой по оптоволокну.

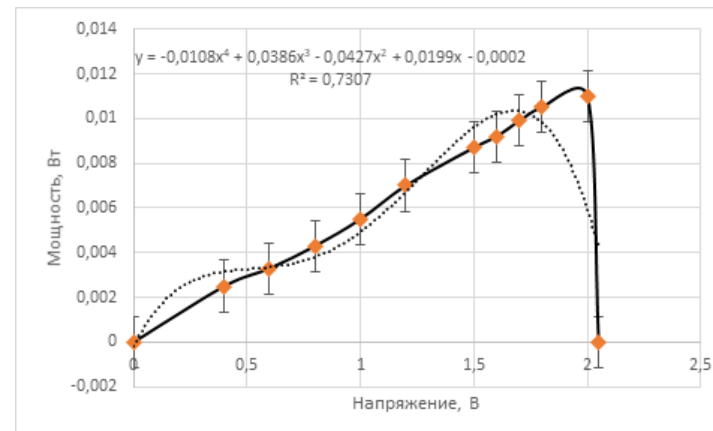


Рисунок 3 – Зависимость выходной мощности фотоприёмника от количества подключённых лазеров

На рисунке 4 представлен график, иллюстрирующий зависимость между током, потребляемым лазером, и его напряжением.

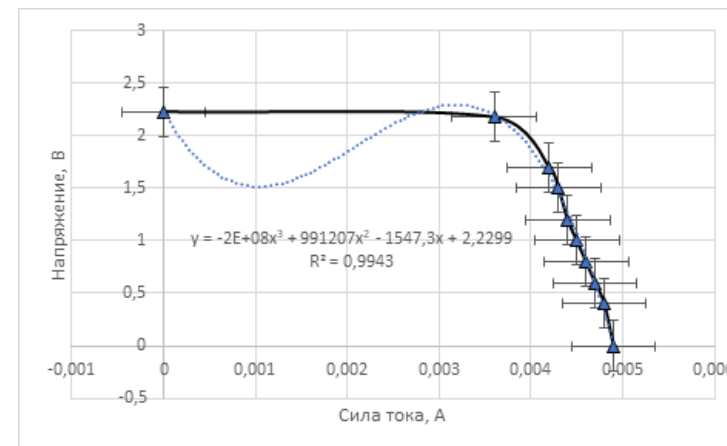


Рисунок 4 – Зависимость напряжения фотоприёмника от силы тока

В то же время, для внедрения предложенной системы в реальную практику необходимы дальнейшие исследования и усовершенствования. Одно из первоочередных направлений – повышение КПД передачи энергии

сверх достигнутых 13,7 %. Для этого планируется оптимизация как источника оптического излучения (например, применение более эффективных или мощных лазерных диодов), так и приемного фотоэлектрического преобразователя, а также реализация мер термостабилизации с целью снижения потерь в этих компонентах. Перспективным шагом является внедрение системы динамического управления мощностью с обратной связью, что позволит автоматически поддерживать оптимальный режим работы при изменении нагрузки [11]. Ещё одним важным направлением развития станет интеграция технологии подачи энергии по волокну в существующие волоконно-оптические линии связи. Так, использование разных длин волн может дать возможность накладывать канал энергопитания на уже функционирующий оптический кабель, не мешая передаче данных, что упростит распространение метода без строительства отдельной инфраструктуры. Кроме того, требуется работа над миниатюризацией компонентов системы – уменьшением габаритов лазерных модулей, оптоволоконных вводов и фотоэлектрических приемников [12]. Сокращение размеров и энергопотребления элементов сделает технологию более удобной для практического применения, позволяя интегрировать её в компактные датчики или узлы управления. В сумме, проделанная работа заложила основу для нового класса волоконно-оптических систем, объединяющих энергоснабжение и обмен информацией.

Выводы

Таким образом, проведённое исследование подтвердило принципиальную возможность передачи энергии по оптоволоконному проводнику. Созданная система успешно обеспечила доставку электрической мощности к удалённой нагрузке через оптоволоконную линию при одновременном обмене данными по тому же каналу. В экспериментах получены конкретные количественные показатели эффективности: в частности, достигнут суммарный коэффициент полезного действия порядка 13,7 % для передачи мощности в заданной конфигурации. При этом передача информационного сигнала оказалась стабильной на фоне оптического потока большой мощности, что свидетельствует о том, что присутствие высокоэнергетического луча не препятствует надёжной связи. Данные результаты подтверждают жизнеспособность предложенного подхода и служат отправной точкой для последующих улучшений.

Полученные выводы указывают на широкие перспективы практического применения разработанной системы. Волоконно-оптический канал, способный передавать питание, обладает очевидными достоинствами в ситуациях, когда использование традиционных электрических кабелей затруднительно, дорого или небезопасно. Например, в системах удалённого

мониторинга промышленного оборудования, экологических датчиков или объектов критической инфраструктуры достаточно проложить один оптоволоконный кабель, который будет одновременно снабжать датчики энергией и передавать их показания – это значительно упрощает монтаж и обслуживание таких систем. В сетях управления и связи, особенно эксплуатирующихся во взрывоопасных зонах, в условиях сильных электромагнитных помех или на объектах с высоким потенциалом (линии электропередач, подстанции), использование оптоволоконной линии для питания и передачи данных заметно повышает безопасность и надёжность. Волокно обеспечивает электрическую изоляцию и невосприимчивость к наводкам, что снижает риск коротких замыканий, исключает искрообразование и решает проблемы электромагнитной совместимости. Таким образом, разработанная технология открывает новые возможности для систем мониторинга, управления и сбора данных в самых разных областях – от энергетики и транспорта до аэрокосмической отрасли и телекоммуникаций.

Настоящая научная работа является результатом реализации проекта ИРН № AP26195899 «Разработка передовой системы одновременной передачи энергетических и информационных параметров по волоконно-оптическому проводнику» в рамках грантового финансирования Комитетом науки и высшего образования Республики Казахстан.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 **Matsuura, M.** Power-over-fiber using double-clad fibers //Journal of Lightwave Technology. – 2022. – №. 10. – Vol. 40.– P. 3187–3196.
- 2 **Jialong, Li., Aoyan, Zhang., Guiyao, Zhou., Jiantao, Liu., Changming, Xia., Zhiyun, Hou.** A Large-Core Microstructure Optical Fiber for Co-Transmission of Signal and Power// J. Lightwave Technol.– 2021.– №39.– P.4511-4516;
- 3 **Al-Zubaidi, F. M. A., Montero, D. S., Vázquez, C.** SI-POWER OVER FIBER (POF) Supporting Power-Over-Fiber in Multi-Gbit/s Transmission for In-Home Networks // Journal of Lightwave Technology.– 2021.– Vol. 39.–No. 1.– P. 112-121. doi: 10.1109/JLT.2020.3025444.
- 4 **Matsuura, Motoharu., Nomoto, Hayato., Mamiya, Hikaru., Higuchi, Tadanobu., Masson, Denis., Fafard, S.** Over 40-W Electric Power and Optical Data Transmission Using an Optical Fiber// IEEE Transactions on Power Electronics.– 2021.– №36.– P.4532–4539. doi:10.1109/TPEL.2020.3027551.

5 **Putra, E. P. et al.** Technology update on patent and development trend of power over fiber: a critical review and future prospects //Journal of Photonics for Energy. – 2023. – Vol. 13. – №. 1. – P. 1-11.

6 **Isomov, M.** CALCULATION OF SIGNAL DISPERSION IN OPTICAL FIBER //Modern Science and Research. – 2023. – Vol. 2. – №. 10. – P. 127–129.

7 **Kim, T.** Analysis of Optical Communications, Fiber Optics, Sensors and Laser Applications //Journal of Machine and Computing. – 2023. – P. 115–125.

8 **Armghan, A.** Addressing nonlinear Impairments in fiber optic communication system utilizing novel modulation schemes //Frequenz. – 2023. – Vol. 77. – № 3–4. – P. 125–132.

9 **Konstantinou, G. et al.** Improved two-photon polymerization through an optical fiber using coherent beam shaping //Optics and Lasers in Engineering. – 2023. – Vol. 160. – P. 107232.

10 **Panchak, Alexander., Khvostikov, Vladimir., Pokrovskiy, Pavel.** AlGaAs gradient waveguides for vertical p/n junction GaAs laser power converters// Optics & Laser Technology.– 2020.– P.136. doi: 106735. 10.1016/j.optlastec.2020.106735

11 **Mekhtiyev, A., Neshina, Y., Alkina, A., Yugay, V., Kalytk, V., Sarsikayev, Y., Kirichenko, L.** Developing an Intelligent Fiber-Optic System for Monitoring Reinforced Concrete Foundation Structure Damage// Applied Sciences.– 2023.– Vol.13(21).–P.11987. doi:10.3390/app132111987 (Scopus процентиль 63, WoS Q1)

12 **Kalytk, V., Baimukhanov, Z., Neshina, Y., Mekhtiyev, A., Dunayev, P., Galtseva, O., Senina, Y.** Influence of Quantum Effects on Dielectric Relaxation in Functional Electrical and Electric Energy Elements Based on Proton Semiconductors and Dielectrics// Applied Sciences (Switzerland).– 2023.– Vol.13(15).–P.8755 doi:/10.3390/app13158755 (Scopus процентиль 70, WoS Q1)

Поступило в редакцию 21.07.25

Поступило с исправлениями 25.07.25

Принято в печать 08.09.25

Е. Г. Нешина¹, А. Д. Мехтиева², Н. Б. Калиаскаров^{3},*

А. Д. Алькина⁴, Д. Т. Мукашева⁵

^{1,2,3,4}«Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті

Қазақстан Республикасы, г. Қарағанды;

⁵Қазақстан стандарттау және метрология институты, РМК,

Қазақстан Республикасы, г. Астана.

21.07.25 ж. баспаға түсті.

25.07.25 ж. түзетулерімен түсті.

08.09.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

ОПТИКАЛЫҚ ТАЛШЫҚ АРҚЫЛЫ ЭЛЕКТРЛІК ҚУАТТЫ ТІІМДІ ЖІБЕРУДІ ЗЕРТТЕУ

Бұл мақалада бір талшықты-оптикалық арна арқылы энергияны жіберу жүйесін әзірлеу және эксперименттік тексеру ұсынылған. Болашағы бар шешімдердің бірі-энергияны тасымалдау үшін де, ақпарат алмасу үшін де талшықты-оптикалық желілерді пайдалануды көздейтін power-over-Fiber (POF) технологиясы. Жартылай өткізгіш лазерлерді, G. 651 стандартты талшықты-оптикалық желіні және жүктеме фотодетекторын қамтитын зертханалық стендтің архитектурасы сипатталған. Әр түрлі жұмыс режимдерінде жүйенің электрлік және жылу параметрлерін өлшеу жүргізілді. 13,7% деңгейінде пайдалы әсер ету коэффициентіне қол жеткізе отырып, электр қуатын 0,08 Ваттқа дейін тиімді беру мүмкіндігі эксперименталды түрде расталды. Сондай-ақ, көп арналы оптикалық конфигурация негізінде энергия мен ақпаратты бірлескен беру схемасы қарастырылған. Жұмыс Тұжырымдаманың практикалық іске асырылуын және оны телеметриялық жүйелерде, автоматикада қолдану перспективасын көрсетеді. Тиімділікті арттыруды, компоненттерді миниатюризациялауды және қолданыстағы талшықты-оптикалық желілермен интеграциялауды қоса алғанда, одан әрі зерттеу бағыттары негізделген. Алынған нәтижелер дәстүрлі электрмен қоректендіру мүмкін болмаған кезде, сенімділік талап етілетін күрделі немесе қауіпті жағдайларда энергияға тәуелсіз тораптарды, кіріктірілген сенсорларды және автономды мониторинг құрылғыларын әзірлеуде қолданылуы мүмкін.

Кілтті сөздер: талшықты-оптикалық қуат беру, power-over-Fiber (POF), талшықты-оптикалық қуат жүйелері, фотодетектор, талшықты-оптикалық сенсор, электронды құрылғылар, баламалы энергия көздері, фотовольтаика.

Y. G. Neshina¹, A. D. Mekhtiyev², N. B. Kaliaskarov^{3},*

A. D. Alkina⁴, D. T. Mukasheva⁵

^{1,2,3,4}«Karaganda technical university named A.Sagynov»,

Republic of Kazakhstan, Karaganda;

⁵RSE «Kazakhstan Institute of Standardization and Metrology»,

Republic of Kazakhstan, Astana.

Received 21.07.25

Received in revised form 25.07.25

RESEARCH ON TRANSMISSION EFFICIENCY ELECTRICAL POWER THROUGH OPTICAL FIBER

This article presents the development and experimental verification of an energy transmission system over a single fiber-optic channel. One of the most promising solutions is the Power-over-Fiber (PoF) technology, which involves the use of fiber-optic lines for both energy transportation and information exchange. The architecture of a laboratory stand including semiconductor lasers, a G.651 fiber optic line, and a photodetector with a load is described. Measurements of the electrical and thermal parameters of the system under various operating modes have been carried out. The possibility of efficient transmission of electrical power up to 0.08 W with an efficiency of 13.7 % has been experimentally confirmed. A scheme of combined energy and information transmission based on a multichannel optical configuration is also considered. The work demonstrates the practical feasibility of the concept and the prospects of its application in telemetry systems and automation. The directions of further research are justified, including increasing efficiency, miniaturization of components and integration with existing fiber-optic networks. The obtained results can be used in the development of energy-independent nodes, embedded sensors, and autonomous monitoring devices for operation in complex or remote environments where traditional power supply is unavailable and high reliability is required.

Key word: fiber-optic energy transmission, Power-over-Fiber (PoF), fiber-optic power supply systems, photodetector, fiber-optic sensor, electronic devices, alternative energy sources, photovoltaics.

<https://doi.org/10.48081/WAOW1921>

**А. В. Нефтисов¹, *Л. Н. Кириченко², И. М. Казамбаев³,
Е. В. Командиров⁴, Е. А. Белощицкий⁵**

¹Academy of Physical Education and Mass Sports,
Республика Казахстан, г. Астана

²ТОО «Astana IT University», Республика Казахстан, г. Астана;

³ТОО «Astana IT University», Республика Казахстан, г. Астана;

⁴ТОО «Атриум Строй Инвест», Республика Казахстан, г. Павлодар;

⁵ТОО «Astana IT University», Республика Казахстан, г. Астана.

¹ORCID <https://orcid.org/0000-0003-4079-2025>

²ORCID <https://orcid.org/0000-0001-7069-5395>

³ORCID <https://orcid.org/0000-0003-0850-7490>

⁴ORCID <https://orcid.org/0000-0002-3549-8393>

⁵ORCID <https://orcid.org/0009-0008-9285-3145>

*e-mail: lalita17021996@gmail.com

КОНЦЕПТ АППАРАТНО-ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАСХОДА ВОДЫ В РЕКАХ С ПРИМЕНЕНИЕМ КРОСС- КОРРЕЛЯЦИОННОГО МЕТОДА

В данной статье представлен концепт аппаратно-программного комплекса для непрерывного измерения потока в открытых каналах, использующего ультразвуковые доплеровские сенсоры и метод анализа по взаимной корреляции. Решение разработано для повышения точности измерений уже установленных на реке Талас датчиков измерения расхода, использующих эффект Доплера. Для оценки точности измерения произведены экспериментальные замеры с помощью стационарных доплеровских расходомеров и гидрометрических вертушек ГМЦМ-1, которые показали необходимость разработки и внедрения метода взаимной корреляции. Предложенный концепт включает в себя математическое моделирование, адаптированное к размерам и гидравлическим условиям реки, что позволяет оценить среднюю горизонтальную скорость и объемный расход с заметным снижением неопределенности по сравнению с традиционными методами. Архитектура прототипа

реализована на платформе Raspberry Pi 4, интегрированной с модулями преобразования и ультразвуковыми датчиками на 40 кГц, что позволяет осуществлять сбор и обработку данных в реальном времени. Полученные данные обрабатываются для более точного расчета средней скорости потока и расхода, предлагая эффективный, точный и адаптируемый инструмент для гидрологического мониторинга и устойчивого управления водными ресурсами.

Ключевые слова: кросс-корреляционный метод, доплеровские датчики, измерение, расход, открытые потоки

Введение

Надежное количественное определение расхода воды в открытых каналах имеет важное значение для обеспечения устойчивого управления водными ресурсами. Для измерения уровня и последующего расчета расхода на многих гидро измерительных постах в Казахстане используются линейные уровнемеры [1], которые являются наиболее простым и недорогим решением для измерения уровня воды. Основным недостатком данного метода является ограниченная точность и высокая погрешность измерения [2, 3]. Другим методом является измерение с помощью поплавковых уровнемеров [4], которые работают на основе вертикального перемещения поплавка, соединенного с датчиком положения. Такие датчики измеряют лишь уровень, что не дает точных данных о количестве воды в русле реки [5]. Более точным методом являются радарные уровнемеры [6, 7], которые используют радиоволны для определения расстояния до поверхности воды. Такие уровнемеры используют бесконтактный способ измерения, при котором уменьшается износ и загрязнение чувствительных элементов датчика, однако имеют высокую стоимость [8]. Также для некоторых моделей необходимо повышенное энергопитание, что создает дополнительные трудности для осуществления измерения и мониторинга в удаленных от населенных пунктов местах. Пьезорезистивные и пьезометрические датчики имеют довольно высокую точность, однако требуют частой поверки и калибровки [9, 10]. Другим бесконтактным видом сенсоров являются оптические расходомеры [11], которые используют принцип измерения времени возврата светового или лазерного луча, отраженного от поверхности воды. Однако данный вид датчиков является одним из наиболее дорогостоящих. Ультразвуковые датчики являются популярным и относительно недорогим решением для измерения расхода воды в открытых руслах рек. Одноканальные ультразвуковые уровнемеры [12, 13] имеют простую конструкцию и принцип измерения. Один ультразвуковой импульс отправляет вертикально вниз. Датчик обнаруживает отраженное эхо и вычисляет расстояние на основе

времени, необходимого сигнала для прохождения до воды и возврата к преобразователю. Основным недостатком является то, что данный вид датчиков требует чистой воды без загрязнений, волн и других помех, что невозможно обеспечить при измерении воды в реках. Ультразвуковые расходомеры по времени прохождения сигнала [14, 15] принцип измерения разности времени прохождения импульса в прямом и обратном направлениях. Однако, при наличии пузырей, взвесей, что естественно для потока естественных рек, снижается точности измерения. Также необходим стабильный ламинарный поток. В отличие от ультразвуковых расходомеров по времени прохождению сигнала датчики, работающие по принципу Доплера [16, 17], позволяют проводить измерения при наличии взвесей, пузырьков воздуха и других нарушений потока. Принцип действия основан на определении скорости воды путем измерения сдвига частоты ультразвукового сигнала, отраженного движущимися частицами в потоке. Таким образом доплеровские ультразвуковые расходомеры хорошо подходят для проведения измерений в открытых потоках рек.

Целью данного исследования является разработка аппаратно-программного комплекса для определения расхода воды в открытом канале, основанного на доплеровском методе с применением кросс-корреляционного подхода для повышения точности измерений.

Задачи:

1 Анализ работы измерительных устройств на основе доплеровского эффекта для измерения скорости течения в открытых водных потоках.

2 Разработка математической модели измерения расхода воды на открытых каналах с применением доплеровского эффекта и кросс-корреляционного метода.

3 Разработка концепта аппаратно-программного комплекса для измерения расхода воды, включающего доплеровские сенсоры, цифровую обработку сигналов с использованием кросс-корреляционного метода.

Материалы и методы

Метод Доплера основан на применении акустического эффекта Доплера (рисунок 1). Принцип работы доплеровских расходомеров заключается в излучении ультразвукового луча, частотой f_0 , от преобразователя, ориентированного под заданным углом θ к направлению потока. Частицы, переносимые жидкостью, частично отражают этот акустический сигнал.

В результате относительного движения между датчиком и частицами отраженный сигнал имеет измененную частоту f_r . Система расходомера рассчитывает разницу частот:

$$\Delta f = f_r - f_0. \quad (1)$$

Используя разность частот (1) рассчитывается скорость потока.

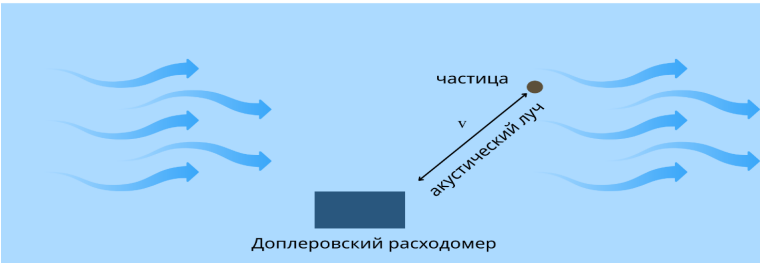


Рисунок 1 – Принцип работы Доплеровского расходомера

$$v = \frac{\Delta f \cdot c}{2 f_0 \cos \theta}, \tag{2}$$

где v – скорость потока,
 Δf – разность между отраженной частотой и излучаемой частотой,
 c – скорость акустического луча в среде,
 f_0 – излучаемая частота,
 θ – угол падения излучаемого луча относительно направления потока.

Если известна геометрия реки, можно рассчитать объемный расход воды Q [18]

$$v = \frac{\Delta f \cdot c}{2 f_0 \cos \theta}, \tag{3}$$

где v – скорость потока,
 A – эффективная площадь поперечного сечения потока.

Важно учитывать, что в отрытых потоках реки скорость потока варьируется от глубины канала h и ширины канала (рисунок 2), так как из-за воздействия трения о стенки и дно русло, а также наличия осадений, возникает внутренняя турбулентность потока. Учитывая такое нелинейное поведение, использование точечного измерения может привести к погрешности. Поэтому в традиционных системах в (3) используется средняя скорость течения $v_{ср}$, для вычисления которой строится эпюра вертикального профиля скоростей потока.

Однако из-за влияния внешней среды, сезонных колебаний стока реки скорость, а также вид течения (ламинарный, турбулентный) изменяются. Соответственно эпюра профиля скорости потока динамически и пространственно изменяемая величина, что в свою очередь требует

своевременной калибровки расходомера для избежания высокой погрешности и ошибок измерения.

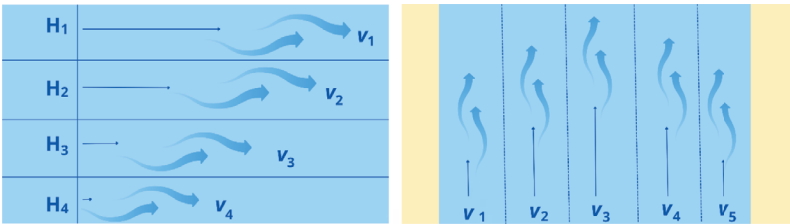


Рисунок 2 – а) – зависимость скорости потока реки от глубины канала, б) – зависимость скорости потока реки от ширины канала

В настоящее время на реке Талас размещено четыре доплеровских датчика расхода воды ($N=4$) для полного поперечного охвата всей ширины реки, которая составляет $W = 52$ м. Каждый измеряет скорость на своей вертикали. В таблице 1 представлены результаты замеров на реке Талас, произведенных с помощью стационарных доплеровских расходомеров и гидрометрических верушек ГМЦМ-1 1605.

Таблица 1 – Результаты измерения скорости потока на реке Талас

Тип измерительного устройства	Уровень, см			
	55	47	45	40
Стационарный доплеровский расходомер	1.47	1.32	1.59	1.53
Гидрометрическая вертушка ГМЦМ-1 1605	1.48	1.42	1.77	1.8
	1.47	1.36	1.68	1.72
	1.20	1.31	1.5	1.59
	0.99	1.13	1.23	1.40
	1.28	1.30	1.55	1.62
Погрешность	8,7%	11,87%	2,6%	10%

Замеры произведенные на реке Талас показали расхождения между стационарным доплеровским расходомером и эталонным устройством ГМЦМ-1 1605. Для повышения точности измерений Доплеровскими датчиками предлагается применение кросс-корреляционного метода, который заключается в измерении временной задержки между сигналами двух аппертур (аппертура 1 – вверх по течению, аппертура 2 – вниз по течению), когда как в традиционных датчиках Доплера [16, 17] измеряется сдвиг частоты на одной аппертуре.

Результаты и обсуждение

В рамках построения математической модели кросс-корреляционного метода для одного датчика, определяем отраженный от микрочастиц N_p акустический сигнал, как комплексную огибающую

$$s_{k,i}(t) = \sum_{n=1}^{N_p} A_n e^{(j2\pi f_0 t - 2k_0 x_{k,i}(t) + \varphi_n)}. \quad (4)$$

где f_0 – несущая частота,

k_0 – волновое число в воде,

$x_{k,i}(t)$ – мгновенное положение k -й апертуры,

φ_n – случайная фаза n -ой частицы.

Для определения временного сдвига между апертурами вычисляем нормированную взаимную корреляционную функцию

$$R_i(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T (s_{1,i}(t) - \bar{s}_{1,i})(s_{2,i}(t + \tau) - \bar{s}_{2,i}) dt, \quad (5)$$

$s_{1,i}(t)$ – комплексная огибающая эхо, полученная апертурой 1 (вверх по течению),

$s_{2,i}(t)$ – комплексная огибающая эхо, полученная апертурой 2 (вниз по течению),

$\bar{s}_{1,i}$ – временное среднее значение комплексной огибающей сигнала $s_{1,i}(t)$,

$\bar{s}_{2,i}$ – временное среднее значение комплексной огибающей сигнала $s_{2,i}(t)$,

T – время накопления.

Момент времени, при котором корреляция выше всего, показывает, сколько времени потребовалось потоку, чтобы пройти от первой апертуры ко второй

Аргумент максимума модуля корреляции соответствует задержке $s_{1,i}(t)$ от $s_{2,i}(t)$

$$\tau_i = \arg \max |R_i(\tau)|. \quad (6)$$

Скорость вдоль акустического луча

$$v_{b,i} = \frac{L}{\tau_i} \quad (7)$$

где L – базовая дистанция кросс-корреляционной пары.

Определение средней скорости потока для определения общего расхода

$$u_i = v_{b,i} \cos \theta, \quad (8)$$

где θ – угол наклона луча к горизонтали.

Оценка статистической погрешности скорости, которая выводится из критерия Крамера–Рао

$$\sigma_{u,i} \approx \frac{L \sigma_{\tau,i}}{\cos \theta \tau_i^2}, \quad (9)$$

$$\text{где } \sigma_{\tau,i} = \frac{0,64\sqrt{2}}{SNR\sqrt{BT}}$$

Для расчета объемного расхода воды вводится дискретную сегментация по ширине на четыре сектора, т.к на реке Талас в настоящее время установлено четыре датчика.

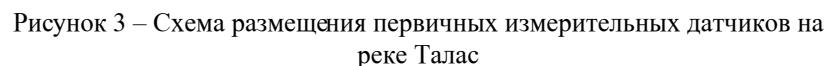
$$Q = \sum_{i=1}^4 u_i h_i \Delta y_i \quad (10)$$

где y_i – поперечная координата i -го датчика,

h_i – глубина в точке y_i ,

Δy_i – ширина сектора, представляемого датчиком.

Измерение гидравлических параметров потока воды в русле реки Талас осуществляется с использованием четырёх стационарных ультразвуковых расходомеров, работающих по доплеровскому методу (рисунок 3).



Первичные измерительные датчики установлены на основе ультразвукового эффекта Доплера с применением кросс-корреляционного метода на дне канала в фиксированных точках, что позволяет обеспечивать равномерный охват поперечного сечения потока и повышение точности вычисления расхода. На рисунке 4 представлена схема подключения первичных измерительных датчиков и Raspberry Pi.



Рисунок 4 –Схема подключения расходомеров, реализованная на Raspberry Pi: а) первый уровень; б) – второй уровень.

Каждый первичный преобразователь формирует цифровой поток данных, включающий значения мгновенной скорости, объемный расход м³/ч. Эти данные передаются Raspberry Pi 4, где собираются, обрабатываются и передаются на операторский интерфейс, а далее на верхний уровень в Scada-систему с последующей архивацией и хранением данных. Raspberry Pi обрабатывает полученные данные применяя кросс-корреляционный анализ между переданным и принятым сигналом (рисунок 5).

```

52     huff[] = self.encoding.getByte(self.encoding.getByte(
53         self.samples[i] - huff * np.mean(huff)) + current_byte)
54
55     def estimate_discrete(self, reference, np.channels):
56         """
57         Estimate discrete reference from self estimate (N samples)"""
58         curve = np.concatenate([self.samples, reference, self.huff])
59         log_probs = np.concatenate([curve, self.huff])
60         self.discrete = log_probs / N_SAMPLES
61         return self.discrete
62
63     def compute_velocity(self):
64         self.velocity = (1. / N_SAMPLES * self.discrete) * COS_PI_2
65         return self.velocity
66
67     def compute_discharge(self):
68         self.discharge = self.velocity * DIFFUSION[self.index] * DELTA_T
69         return self.discharge
70
71     def build_references(self) -> np.ndarray:
72         """Generate analytic reference burst used for correlation"""
73         t1 = np.arange(0, N_SAMPLES * 2 * N_SAMPLES, 2 * N_SAMPLES)
74         ref = np.zeros(1) * np.ones(2 * N_SAMPLES * 2 * N_SAMPLES)
75         return (ref * self.references).astype(np.float32)
76
77     def sort(self):
78         reference = build_references()
79         channels_idx = [np.argmin(channels[i], ch) for i, ch in enumerate(channels)]
80
81         try:
82             while True:
83                 for ch in channels_idx:
84                     ch.sort()
85                     ch.sort_index(inplace=True)
86                     ch.compute_velocity()
87                     ch.compute_discharge()
88                 if np.all(ch.velocity == 0):
89                     velocities = [1 / (ch.velocity * 3F) for ch in channels_idx]
90                     print("({})".format(' '.join([velocities[i] + f_{total} - {total} * (1 / {total})]
91                                     for i, total in enumerate(velocities))))
92                     time.sleep(N_SAMPLES * PERIOD)
93
94         except KeyboardInterrupt:
95             pass
96         finally:
97             plt.figure, PLOT([t1, t2, t3]) * stop_PLOT

```

Рисунок 5 – Алгоритм кросс-корреляционного анализа

Представленный на рисунке 5 код реализует передачу ультразвукового сигнала частотой 40 кГц, прием сырых данных из четырёх каналов, выполняет кросс-корреляционный анализ, оценивая временную задержку, рассчитывает среднюю горизонтальную скорость и расход потока.

Информация о финансировании (при наличии)

Исследования выполнены при поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан в рамках программы ИРН BR24993128 «Разработка информационно-аналитической системы для принятия решений для эффективного использования трансграничных водных ресурсов в сельскохозяйственной отрасли Жамбылского региона»

Выводы

Полевые испытания, проведенные на реке Талас выявили расхождения между значениями скорости, полученными с помощью стационарного

доплеровского расходомера, и значениями, зарегистрированными эталонным гидрометрическим измерителем. Для повышения точности измерения разработан концепт применения метода кросс-корреляции, где вместо измерения сдвига частоты на одной апертуре, метод оценивает временную задержку между эхо-сигналами, полученными на двух пространственно разделенных апертурах, тем самым связывая задержку непосредственно со скоростью течения и минимизируя ошибки, связанные с амплитудой.

Описана математическая модель кросс-корреляционного метода с учетом конфигурации уже установленных на реке Талас доплеровских датчиков расхода. Для практической реализации модели была разработана аппаратно-программная архитектура на базе Raspberry Pi, сопутствующий код выполняет генерацию импульсов, высокочастотную дискретизацию, извлечение задержки кросс-корреляции и расчет разряда в реальном времени.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Hu, X., Chen, C., Wang, G., Singh, J.** Robust Water-Level Measurement Method Based on Computer Vision [Text] // *Journal of Hydrology*. – 2023. – Vol. 619, Issue 6, No. 4. – P. 129456-1–129456-14.

2 **López, M., Martínez, P., Quintana, F., González, A., García, M., Rodríguez, R.** Improving Image-Based Water-Level Monitoring by Coupling Water-Line Detection with Staff-Gauge Tracking [Text] // *Environmental Modelling & Software*. – 2025. – Vol. 173, Issue 1, No. 102. – P. 106509-1–106509-13.

3 **Li, Y., Zhang, H., Sun, J., Wu, Y.** Real-Time Water Levels Using GNSS-IR: A Potential Tool for Flood Early Warning [Text] // *Geophysical Research Letters*. – 2023. – Vol. 51, Issue 17, No. 4. – P. e2023GL105039-1–e2023GL105039-9.

4 **Qi, J., Ma, L., Zhou, D., Wang, X., Chen, Y., Liu, H.** A Review of Non-Contact Water-Level Measurement Based on Computer Vision and Radar Technology [Text] // *Water*. – 2023. – Vol. 15, Issue 18, No. 3233. – P. 1–34.

5 **Kobayashi, T., Asada, M.** High-Accuracy Surface-Perceiving Water-Level Gauge with Self-Calibration [Text] // *Remote Sensing of Environment*. – 2024. – Vol. 299, Issue 4, No. 113889. – P. 1–18.

6 **Chen, L., Liu, Y., Wang, D.** Accurate Non-Linearity and Temperature Compensation for Piezoresistive Pressure Sensors [Text] // *Sensors*. – 2023. – Vol. 23, Issue 13, No. 6167. – P. 1–21.

7 **Su, G., Xue, X., Zhao, R.** Calibration of Marine Pressure Sensors Using a Constant-Pressure Variable-Temperature Scheme [Text] // *Journal of Marine Science and Engineering*. – 2024. – Vol. 12, Issue 12, No. 2366. – P. 1–18.

8 **Wu, S., Guo, X., Zheng, Y.** Development of a High-Precision and Wide-Range Ultrasonic Water Meter [Text] // *Measurement*. – 2022. – Vol. 208, Issue 2, No. 112235. – P. 1–13.

9 **Kulkarni, R., Das, P., Tripathi, M.** Evaluation of Ultrasonic Sensors for Flow Measurement in Open Channels [Text] // *Flow Measurement and Instrumentation*. – 2025. – Vol. 92, Issue 4, No. 102080. – P. 1–12.

10 **Zhou, X., Wang, S., Cao, J.** Transient Effects of Bubbles on Transit-Time Ultrasonic Flowmeters in Natural Streams [Text] // *Water Resources Research*. – 2023. – Vol. 59, Issue 9, No. e2023WR033012. – P. 1–17.

11 **Paterson, A., Bates, K.** Acoustic Doppler Velocimetry in Transient Free-Surface Flows [Text] // *Journal of Hydraulic Engineering*. – 2024. – Vol. 151, Issue 7, No. 04024018. – P. 1–12.

12 **Delgado, F., Rodríguez-Castellanos, M.** Velocity Measurements in Developing Narrow Open-Channel Flows Using ADV and LDA [Text] // *Experimental Thermal and Fluid Science*. – 2022. – Vol. 145, Issue 3, No. 110571. – P. 1–10.

13 **Zhang, C., Li, J., Chen, B.** Research on Mobile Ultrasonic Stratified-Flow Velocity Measurement [Text] // *Frontiers in Water*. – 2025. – Vol. 2, Issue 4, No. 1590124. – P. 1–15.

14 **Shen, K., Gong, Y., Li, H.** Low-Cost IoT-Based Deep Learning Water-Gauge Reader for Remote Streams [Text] // *Geocarto International*. – 2024. – Vol. 39, Issue 8, No. 10. – P. 992–1014.

15 **Gurung, M., Kafle, A., Sharma, L.** Low-Cost Water-Level Measurement Technologies for Assessing Hydrological Extremes [Text] // *Frontiers in Marine Science*. – 2025. – Vol. 12, Issue 1, No. 1604069. – P. 1–14.

16 **Hernández-Nolasco, J. A., Wister Ovando, M. A., Acosta, F. D., Pancardo, P.** Water Level Meter for Alerting Population about Floods [Text] // *Proceedings of the 30th IEEE International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA)*. – Crans-Montana, Switzerland : IEEE, 2016. – P. 879–884.

17 **Chen, C., Zhang, X., Liu, Z., Wang, Q., Li, M.** An Integrated Method for River Water-Level Recognition from Surveillance Images Using Convolution Neural Networks [Text] // *Remote Sensing*. – 2022. – Vol. 14, Issue 23, No. 6023. – P. 1–20.

18 **Arregui, F., Contreras, J. I., Martínez, F., Gil, M., Torres, R.** Key Factors Affecting Water Meter Accuracy [Text] // *Proceedings of the International Conference on Leakage Control*. – London : IWA Publishing, 2005. – P. 1–10.

Поступило в редакцию 12.08.25
Поступило с исправлениями 12.08.25

А. В. Нефтисов¹, *Л. Н. Кириченко², И. М. Казамбаев³,

Е. В. Командиров⁴, Е. А. Белошчыцкий⁵

¹Academy of Physical Education and Mass Sports,

Қазақстан Республикасы, Астана қ.

²Astana IT University, Қазақстан Республикасы, Астана қ.

³Astana IT University, Қазақстан Республикасы, Астана қ.

⁴«Атриум Строй Инвест» ЖШС, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.

⁵Astana IT University, Қазақстан Республикасы, Астана қ.

12.08.25 ж. баспаға түсті.

12.08.25 ж. түзетулерімен түсті.

05.09.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

КРОСС-КОРРЕЛЯЦИЯЛЫҚ ӘДІСТІ ҚОЛДАНА ОТЫРЫП, ӨЗЕНДЕРДЕГІ СУ ШЫҒЫНЫН АНЫҚТАЙТЫН АППАРАТТЫҚ- БАҒДАРЛАМАЛЫҚ КЕШЕННІҢ ТҰЖЫРЫМДАМАСЫ

Бұл мақалада ультрадыбыстық доплерлік сенсорларды және өзара корреляцияны талдау әдісін қолдана отырып, Ашық арналардағы ағынды үздіксіз өлшеуге арналған аппараттық-бағдарламалық кешен тұжырымдамасы ұсынылған. Шешім Талас өзенінде орнатылған Доплер эффектін қолданатын ағынды өлшеу датчиктерінің өлшеу дәлдігін жақсартуға арналған. Өлшеу дәлдігін бағалау үшін өзара корреляция әдісін әзірлеу және енгізу қажеттілігін көрсеткен стационарлық доплерлік Шығын өлшегіштер мен гмцм-1 гидрометриялық айналмалы табақтарының көмегімен эксперименттік өлшеулер жүргізілді. Ұсынылған тұжырымдама өзеннің өлшемдері мен гидравликалық жағдайларына бейімделген математикалық модельдеуді қамтиды, бұл дәстүрлі әдістермен салыстырғанда белгісіздіктің айтарлықтай төмендеуімен орташа көлденең жылдамдық пен көлемдік ағынды бағалауға мүмкіндік береді. Прототиптің архитектурасы Raspberry Pi 4 платформасында жүзеге асырылады, ол түрлендіру модульдерімен және 40 кГц ультрадыбыстық датчиктермен біріктірілген, бұл нақты уақыт режимінде деректерді жинауға және өңдеуге мүмкіндік береді. Алынған мәліметтер гидрологиялық бақылау мен суды тұрақты басқарудың тиімді, дәл және бейімделетін құралын ұсына отырып, ағын мен ағынның орташа жылдамдығын дәлірек есептеу үшін өңделді.

Кілтті сөздер: кросс-корреляция әдісі, Доплерлік датчиктер, өлшеу, ағын, ашық ағындар.

А. V. Neftissov¹, *L.N. Kirichenko², I.M. Kazambaev³,

E.V. Komandirov⁴, E. A. Biloshchytskyi⁵

¹Academy of Physical Education and Mass Sports,

Republic of Kazakhstan, Astana c.

²Astana IT University, Republic of Kazakhstan, Astana c.

³Astana IT University, Republic of Kazakhstan, Astana c.

⁴Atrium Sroy Invest LLP, Republic of Kazakhstan, Pavlodar

⁵Astana IT University, Republic of Kazakhstan, Astana c.

Received 12.08.25

Received in revised form 12.08.25

Accepted for publication 05.09.25

CONCEPT OF A HARDWARE AND SOFTWARE SYSTEM FOR DETERMINING WATER FLOW IN RIVERS USING THE CROSS- CORRELATION METHOD

This article presents a concept for a hardware and software complex for continuous flow measurement in open channels using ultrasonic Doppler sensors and the mutual correlation analysis method. The solution was developed to improve the accuracy of measurements taken by flow sensors already installed on the Talas River using the Doppler effect. To assess the accuracy of the measurements, experimental measurements were made using stationary Doppler flow meters and GMTSM-1 hydrometric impellers, which showed the need to develop and implement a mutual correlation method. The proposed concept includes mathematical modelling adapted to the dimensions and hydraulic conditions of the river, which allows the average horizontal velocity and volumetric flow rate to be estimated with a significant reduction in uncertainty compared to traditional methods. The prototype architecture is implemented on a Raspberry Pi 4 platform integrated with conversion modules and 40 kHz ultrasonic sensors, which allows for real-time data collection and processing. The data obtained is processed for a more accurate calculation of the average flow velocity and flow rate, offering an effective, accurate and adaptable tool for hydrological monitoring and sustainable water resource management.

Keywords: cross-correlation method, Doppler sensors, measurement, flow rate, open channels.

<https://doi.org/10.48081/BXYE1381>**А. Н. Новожилов¹, *Ж. С. Исенов², Т. А. Новожилов³**^{1,2}Торайғыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар³Омский Государственный Технический Университет,

Российская Федерация, г. Омск

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7530-5034>²ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2388-602X>³ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0293-7852>*e-mail: issenov.zh@gmail.com

ЧАСТИЧНЫЕ РАЗРЯДЫ, ПРИЧИНЫ ИХ ВОЗНИКНОВЕНИЯ И ПОСЛЕДСТВИЯ

В процессе эксплуатации электрических машин высокого напряжения под воздействием номинального напряжения различного вида перенапряжений на изоляции обмоток статора возникают частичные разряды.

Частичные разряды, как правило, являются следствием появления дефектов возникающих в изоляции статора электрических машин при ее изготовлении или в результате эксплуатации. Они с течением времени разрушают молекулярные структуры изоляции и вызывают ее нагрев. При этом скорость разрушения изоляции зависит от вида изоляции и ее свойств и может продолжаться от нескольких месяцев до нескольких лет. На практике для защиты изоляции от поверхностных ЧР поверхность обмоток статоров покрывают полупроводящим покрытием.

Однако достаточно часто причинами образования ЧР в обмотке изоляции статора с неповрежденной изоляцией являются поверхностное загрязнение обмотки статора, а также появление на ней влажности.

В связи с этим в статье рассмотрены такие разделы этого явления как природа возникновения частичного разряда, причины возникновения, их типы, внутренние разряды, внутренние расслоения, а также отслоения от проводника, разряды в лобовых частях и разряды в пазу, электропроводящие частицы, их признаки, параметры и последствия частичных разрядов.

Ключевые слова: Электрические машины, обмотка статора, изоляция обмоток, искровой разряд, частичные разряды.

Введение

Сведения о частичных разрядах (ЧР) появилась в начале двадцатого столетия практически одновременно с созданием высоковольтного электрооборудования. В это время изоляция электрооборудования имела достаточный запас электрической прочности и работала при относительно низкой напряженности электрического поля. Поэтому её повреждения из-за недостаточной электрической прочности возникали крайне редко, а дефекты от возникновения ЧР были незначительны [1]. В дальнейшем в связи с совершенствованием высоковольтных электрических машин ситуация стала меняться. Принимаемые конструктивные решения в виде уменьшения размеров электрических машин и расходных материалов используемых на их изготовление привели к повышению напряженности электрического поля. В результате изоляция таких электрических машин оказалась более подверженной действию ЧР [2].

Материалы и методы

ЧР стандартом IEC60270 определяется как: «локальный электрический разряд, частично шунтирующий изоляцию между проводниками обмотки статора. Он является следствием локальных концентраций электрических напряжений в изоляции или на поверхности изоляции. Обычно он проявляется в виде искрового разряда очень маленькой мощности [1]. При этом длительность ЧР составляет намного меньше 1 микросекунды» [3].

ЧР может образоваться как внутри высоковольтной изоляции, так и на ее поверхности. Обычно одиночный ЧР не влечёт за собой особой опасности, так как не приводит к сквозному пробое изоляции. Однако длительное существование ЧР следующих один за другим, как правило, сопровождается местным разрушением диэлектрика. Картина местного разрушения диэлектрика ЧР приведена на рисунке 1 в виде затемненной области.

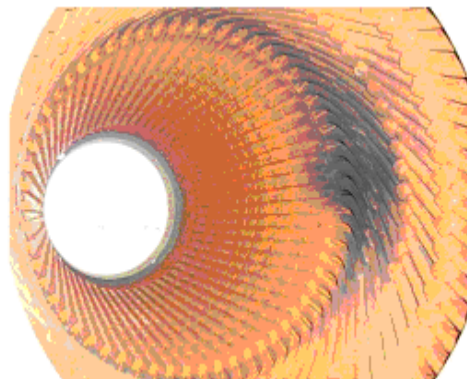


Рисунок 1 – Пример воздействия ЧР на изоляцию обмотки статора электрической машины

В свою очередь местное разрушение диэлектрика приводит к нарушению электрической прочности обмотки статора и сопровождается возникновением короткого замыкания (КЗ) в ней.

Основными причинами возникновения практически всех видов ЧР принято считать дефекты изготовления изоляции обмотки статора, ее старение и износ, а также различного рода перенапряжения, возникающие в процессе эксплуатации. Дефекты изготовления изоляции обмотки статора выражаются в наличии в ней газовых пустот, вкрапления шлаков или примесей, а также капельки жидкости. Наличие дефектов в изоляции приводит к уменьшению диэлектрической проницаемости изоляции, увеличению напряженности электрического поля в области дефекта, приводящей к разряду через него. Со временем из-за длительных воздействий ЧР, например, через газовые пустоты их физический размер может увеличиваться [4].

В тоже время достаточно часто причинами образования ЧР в обмотке статора с неповрежденной изоляцией являются поверхностное загрязнение обмотки статора, а также появление на ней влажности.

В связи с этим в зависимости от причины и места возникновения ЧР их можно достаточно условно разделить на внутренние и поверхностные разряды. Внутренние разряды вызываются наличием инородных вкраплений и расслоением изоляции, отслоением изоляции от проводников секции, которые возникают в пазах и лобовых частях. Поверхностные разряды обычно возникают в результате загрязнения поверхности лобовых частей обмотки статора.

Технология производства изоляции обмоток статоров высоковольтных вращающихся машин, выполняемая из слюды пропитанной компаундом, непрерывно совершенствуется. Несмотря на это в процессе производства этой изоляции в ней образуется некоторое количество внутренних пустот. Физические размеры этих внутренних пустот незначительны. Однако в процессе эксплуатации электрической машины под воздействием ЧР возникающих в этих пустотах размеры этих пустот могут увеличиваться. Но пока они не превышают определенных размеров, эксплуатационная надежность изоляции обмотки статора не уменьшается.

Внутреннее расслоение внутри главной изоляции может быть вызвано чрезмерными механическими нагрузками и тепловыми напряжениями во время работы. Возникновение при этом крупных полостей может достигать больших площадей. Это, с одной стороны, приводит к возникновению ЧР с относительно высокой энергией, которые оказывают значительное влияние на качество изоляции, а с другой стороны это расслоение уменьшает теплопроводность изоляции. Что сопровождается ускоренным ее старению или даже выходом из строя. Поэтому при наличии ЧР необходимо уделить внимание возможности возникновения таких расслоений.

Периодические изменения теплового режима электрической машины могут вызвать отслоение медного проводника от изоляции витка или секции. Это может привести к появлению внутренних пустот, возникновению ЧР и общему снижению эксплуатационной надежности изоляции обмотки статора.

Подавляющее большинство разрядов, наблюдаемых в пазах высоковольтных машин, связано с нарушением целостности проводящего покрытия изоляции секций. Типичный сценарий возникновения такого повреждения включает вибрационные воздействия, которые приводят к ослаблению посадки секций в пазу, что, в свою очередь, вызывает их перемещение. Помимо других причин, проводящий слой подвержен разрушению вследствие эрозии и абразивного износа. Также его целостность может быть нарушена из-за воздействия химически агрессивных сред или наличия производственных дефектов. Мощность разряда, возникающего при таких повреждениях, напрямую коррелирует с их размерами. Если повреждения проводящего покрытия значительны, а изоляция имеет серьезные механические повреждения, это может спровоцировать дополнительное повреждение основной изоляции и привести к ее пробою.

На ранних стадиях разряды в пазу представляют собой вибрационное искрообразование. То есть в прямом смысле не являются ЧР. Это следует из того, что такое искрообразование может также происходить и в частях обмоток с низким электрическим потенциалом относительно корпуса. В частности, вблизи нулевой точки звезды. Время между появлением разрядов

в пазу и пробоем изоляции может быть различным. Оно может быть и небольшим. Поэтому при обнаружении следов разрядов в пазу следует незамедлительно осуществить проведение ремонтных работ.

Высокая напряженность электрического поля в лобовых частях обмотки статора является причиной возникновения частичных разрядов, которые обычно локализуются в промежутках между элементами обмотки. Потеря эффективности защитного покрытия лобовых частей обмоток, которое призвано снижать напряженность поля, может быть вызвана различными факторами, такими как конструктивные недостатки, загрязнение, пористость или температурные воздействия. В результате этого возникает поверхностный разряд, приводящий к существенной эрозии материалов. Несмотря на то, что сам процесс эрозии обычно протекает медленно, поведение ЧР может характеризоваться быстрыми изменениями, обусловленными поверхностными эффектами. Важно отметить, что ЧР также может возникать между фазами, например, вследствие нарушения изоляционных зазоров между вводными зажимами, между зажимами и выступающими элементами конструкции, или между лобовой частью обмотки и землей[5].

Загрязнение поверхности обмотки статора электропроводящими включениями, особенно наноразмерными, способствует возникновению интенсивных локальных ЧР. Данный эффект приводит к деградации изоляционного материала, проявляющейся в виде эрозии (раковин) и микроразрывов (микротрещин)[5].

Электропроводящие частицы представляют собой в составе различные соединения и материалы. Наиболее часто встречаются углеродные электропроводящие частицы в виде пыли, сажи, графита или углеродных нанотрубок. Соединение углеродных нанотрубок и материалов подобных графиту образуют наночастицы. Эти наночастицы отличаются химической стабильностью. Их электропроводность определяется контактными явлениями, так как они являются полупроводниками или полуметаллами.

При наличии трущихся металлических элементов в электрических машинах возможно образование металлических микро- и наночастиц. Они отличаются низким уровнем удельного электрического сопротивления. Обычно они загрязняют поверхность лобовых частей обмотки статора. Такие частицы имеют, а также их сплавы. Наиболее опасными являются включения толщиной 0,25-0,6 мм, в которых частичные разряды происходят у машин с наиболее низкими номинальными напряжениями[2].

Как правило, появление ЧР сопровождается [6] появлением импульсного тока в обмотке статора и электромагнитным излучением в окружающем пространстве, разложением изоляции на молекулярные группы под

воздействием ЧР и локальным нагревом изоляции, возникновением светового излучения и появлением ударных волн.

При этом импульсные токи, циркулирующие по обмотке статора, в конечном счете разряжаются на землю.

Ультрафиолетовое излучение наиболее ярко проявляется при коронном эффекте. Оно связано с испусканием электромагнитного излучения в диапазоне частот ультрафиолетового излучения.

Появление ударных волн [7] характеризуется появлением ультразвука, частота которого намного выше той, которую может обнаружить здоровый человек. Обычно эти ударные волны, генерируемые частичными разрядами, имеют очень высокие частоты, которые могут достигать порядка 100 МГц. [8].

Как отмечено практикой эксплуатации высоковольтных электрических машин чаще всего последствия периодически повторяющихся ЧР заключаются в разрушении высоковольтную изоляцию из-за обугливания и эрозии наружной части изоляции в зоне дефекта. Это «скрытый» период развития дефекта. Пример такой эрозии изоляции показан на рисунке 2.



Рисунок 2 – Последствия воздействия периодически повторяющихся ЧР на обмотку статора электрической машины

Результаты и обсуждение

Развитие зоны дефекта, рано или поздно, приводит к дуговому пробоем всего изоляционного промежутка. Обычно разрушение изоляции, под действием частичных разрядов, происходит достаточно долго в течение многих месяцев, и даже лет [1]. В основном длительность этого процесса зависит от величины рабочего напряжения электрической вращающейся машины.

Когда внутри изоляционного материала имеется достаточное количество токопроводящих промежутков, его изолирующая способность снижается даже при нормальных условиях эксплуатации. На практике эти разряды самые редкие [9]. Для изоляции двигателей и генераторов эксплуатируемых на электрических станциях и промышленных предприятиях [10] основную опасность представляют перенапряжения. Обычно в сетях 3 – 10кВт с изолированной нейтралью они возникают при однофазных замыканиях на землю и резонансных явлениях в сети [11], а также при различных коммутационных переключениях [12].

ЧР измеряется в пикокулонах. Физически этот параметр ЧР определен величиной заряда перенесенного одним импульсом ЧР. В некоторых случаях для теоретического исследования процессов происходящих в изоляции обмотки статора используется понятие «кажущегося разряда». В соответствии с [1, 2] за кажущийся заряд ЧР принимают такой заряд, который введенный между выводами исследуемого объекта, вызовет такое изменение напряжения между этими выводами как реальный ЧР. Измерение кажущегося разряда также осуществляется в пикокулонах.

Выводы

Как показал анализ причин возникновения ЧР и их последствий, то с большой вероятностью можно утверждать, что появлением импульсного тока в обмотке статора и электромагнитным излучением в окружающем пространстве, а также разложением изоляции на молекулярные группы под воздействием ЧР и локальным нагревом изоляции, что как следствие приводит к возникновению светового излучения и появлением ударных волн.

Одним из частых дефектов изготовления изоляции обмотки статора выражаются в наличии в ней газовых пустот, вкрапления шлаков или примесей, а также капельки жидкости. Наличие дефектов в изоляции приводит к уменьшению диэлектрической проницаемости изоляции, увеличению напряженности электрического поля в области дефекта, приводящей к возникновению ЧР.

Разработка новых более чувствительных методов диагностики выявления ЧР в изоляции обмотки статора, что повлияет в последствии на работоспособность и уменьшение процента выхода из строя электрических машин.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Сви П. М. Контроль изоляции оборудования высокого напряжения. М.: Энергоатомиздат. –1988 г. – 128 с.

2 Кучинский Г. С., Кизеветтер В. В., Пинталь Ю. С. Изоляция установок высокого напряжения, – М. : Энергоатомиздат, 2001 г. – 386 с.

3 ГОСТ Р 55191-2012 (МЭК 60270:2000) Методы испытаний высоким напряжением. Измерения частичных разрядов.

4 Сви П. М. Измерения частичных разрядов при эксплуатационном контроле силовых трансформаторов / Электричество. – 1977 г. № 2. – С. 45–50.

5 ГОСТ ИЕС/TS 60034-27-2015, Машины электрические вращающиеся. Часть 27. Измерения частичного разряда на изоляции статорной обмотки отключенных от сети вращающихся электрических машин, М. : Стандартиформ, 2016 год.

6 Андреев А. М., Азизов А. Ш., Андреев И. А., Смирнов А. Н., Степанов А. А., Назаров Г. А. Особенности измерения частичных разрядов в системах изоляции статорных обмоток высоковольтных электрических машин. Надежность и безопасность энергетики. 2021 г., 14(1), С. 61–68. <https://doi.org/10.24223/1999-5555-2021-14-1-61-68>.

7 Вдовико В. П. Оперативная диагностика электрической изоляции высоковольтного оборудования под рабочим напряжением. Сибирский НИИ энергетики, Новосибирск, 1995 г. – 358с.

8 Сви П. М. Измерения частичных разрядов в изоляции оборудования высокого напряжения энергосистем. – М. : Энергия, 1977 г. 199 с.

9 Андрюхин С. П., Вдовико В. П. Установка для обнаружения и измерения частичных разрядов в изоляции высоковольтных аппаратов. В кн. Электрофизическая аппаратура и электрическая изоляция. – М. Энергия, 1970 г. С. 438–442.

10 Корогодский В.И., Кузнецов С.Л., Паперно Л.Б. Релейная защита электродвигателей напряжением выше 1 кВ. -М.: Энергоатомиздат, 1987 г. -248 с.

11 Александров Г. Н. Ограничение перенапряжений в электрических сетях. Учебное пособие. : – Санкт-Петербург: изд. центром подготовки кадров, 2003 г. – 292 с.

12 Новожилов А. Н., Колесников Е. Н., Исупова Н. А., Кудабасев Д. А. Анализ методов моделирования коммутационных переходных процессов в электрических сетях с изолированной нейтралью. Электротехника. – 2013 г.– С. 7–10.

REFERENCES

1 Svi P. M. Kontrol' izolyacii oborudovaniya vysokogo napryazheniya. [Insulation monitoring of high voltage equipment] [Text]. М. : Energoatomizdat. –1988. – 128 p.

2 **Kuchinskij G. S., Kizevetter V. V., Pintel' Yu. S.** Izolyaciya ustanovok vysokogo napryazheniya, [Isolation of high voltage installations] [Text]. – М. : Energoatomizdat, 2001. – 386 p.

3 GOST R 55191-2012 (MEK 60270:2000) Metody ispytaniy vysokim napryazheniem. Izmereniya chastichnyh razryadov. [High-voltage testing methods. Partial discharge measurements] [Text].

4 **Svi P. M.** Izmereniya chastichnyh razryadov pri ekspluatatsionnom kontrole silovyh transformatorov [Measurement of partial discharges during operational control of power transformers] [Text]. Elektrichestvo. –1977. № 2. – P. 45–50.

5 GOST IEC/TS 60034-27-2015, Electric rotating machines. Part 27. Partial discharge measurements on the insulation of the stator winding of rotating electrical machines disconnected from the mains, [Electric rotating machines. Part 27. Partial discharge measurements on the insulation of the stator winding of rotating electrical machines disconnected from the mains] [Text] Moscow: Standartinform, 2016.

6 **Andreev A.M., Azizov A.Sh., Andreev I.A., Smirnov A.N., Stepanov A.A., Nazarov G.A.** Osobennosti izmereniya chastichnyh razryadov v sistemah izolyatsii statornyh obmotok vysokovol'tnyh elektricheskikh mashin. Nadezhnost' i bezopasnost' energetiki [Features of measuring partial discharges in the insulation systems of stator windings of high-voltage electrical machines. Reliability and safety of the energy sector] [Text]. 2021; 14(1):61–68. <https://doi.org/10.24223/1999-5555-2021-14-1-61-68>.

7 **Vdoviko V. P.** Operativnaya diagnostika elektricheskoy izolyatsii vysokovol'tnogo oborudovaniya pod rabochim napryazheniem [Operational diagnostics of electrical insulation of high-voltage equipment under operating voltage] [Text] Sibirskiy NII energetiki, Novosibirsk, 1995.–358 p.

8 **Svi P. M.** Izmereniya chastichnyh razryadov v izolyatsii oborudovaniya vysokogo napryazheniya energosistem [Measurements of partial discharges in the insulation of high-voltage power system equipment] [Text] – М. : Energiya, 1977. 199 p.

9 **Andryuhin S. P., Vdoviko V. P.** Ustanovka dlya obnaruzheniya i izmereniya chastichnyh razryadov v izolyatsii vysokovol'tnyh apparatov [Installation for detecting and measuring partial discharges in the insulation of high-voltage apparatus] [Text] V kn. Elektrofizicheskaya apparatura i elektricheskaya izolyaciya. – М.՝. Energiya, 1970. P. 438–442.

10 **Korogodskiy V.I., Kuzhekov S.L., Paperno L.B.** Relejnaya zashchita elektrodvigatelej napryazheniem vyshe 1 kV [Relay protection of electric motors with a voltage above 1 kV] [Text] -М.: Energoatomizdat, 1987. – 248 p.

11 **Aleksandrov G. N.** Ogranichenie perenapryazhenij v elektricheskikh setyah [Limiting overvoltage in electrical networks] [Text] Uchebnoe posobie.: – Sankt-Peterburg: izd. centrom podgotovki kadrov, 2003 – 292 p.

12 **Novozhilov A. N., Kolesnikov E. N., Isupova N. A., Kudabaev D. A.** Analiz metodov modelirovaniya kommutatsionnyh perekhodnyh processov v elektricheskikh setyah s izolirovannoy nejtral'yu [Analysis of methods for modeling switching transients in electrical networks with isolated neutral] [Text] Elektrotehnika. – 2013. – P. 7–10.

Поступило в редакцию 18.08.25

Поступило с исправлениями 03.09.25

Принято в печать 05.09.25

*А. Н. Новожилов¹, *Ж. С. Исенов², Т. А. Новожилов³*

^{1,2} Торайғыров университеті, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.

³ Омбы Мемлекеттік Техникалық Университеті,

Ресей Федерациясы, Омбы қ.

18.08.25 ж. баспаға түсті.

03.09.25 ж. түзетулерімен түсті.

05.09.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

Жоғары кернеулі электр машиналарын пайдалану кезінде статор орамаларының оқшаулауында әртүрлі кернеулердің номиналды кернеуінің әсерінен ішінара разряд пайда болады.

Ішінара разрядтар, әдетте, электр машиналарының статорын оқшаулау кезінде немесе оны пайдалану кезінде пайда болатын ақаулардың салдары болып табылады. Олар уақыт өте келе оқшаулаудың молекулалық құрылымдарын бұзады және оны қыздырады. Сонымен қатар, оқшаулаудың бұзылу жылдамдығы оқшаулау түріне және оның қасиеттеріне байланысты және бірнеше айдан бірнеше жылға дейін созылуы мүмкін. Іс жүзінде оқшаулауды беттік CFR-ден қорғау үшін статор орамдарының беті жартылай өткізгіш жабынмен жабылған.

Алайда, көбінесе статорды оқшаулау орамасында зақымданбаған оқшаулаумен ТЖ пайда болу себептері статор орамасының беткі ластануы, сондай-ақ ондағы ылғалдылықтың пайда болуы болып табылады.

Осыған байланысты мақалада осы құбылыстың ішінара разрядтың пайда болу сипаты, пайда болу себептері, олардың түрлері, ішкі разрядтар, ішкі стратификациялар, сондай-ақ өткізгіштен бөліну, фронтальды бөліктердегі разрядтар және ойықтағы разрядтар, электр өткізгіш бөліктер, олардың белгілері,

параметрлері және ішінара разрядтардың салдары сияқты бөлімдері қарастырылады.

Кілтті сөздер: Электр машиналары, статор орамасы, орамаларды оқшаулау, ұшқын разряды, ішінара разрядтар.

A. N. Novozhilov¹, *Zh. S. Issenov², T. A. Novozhilov³

^{1,2}Toraighyrov University, Pavlodar, Republic of Kazakhstan

³Omsk State Technical University, Omsk, Russian Federation

Received 18.08.25

Received in revised form 03.09.25

Accepted for publication 05.09.25

During the operation of high-voltage electrical machines, partial discharges occur on the insulation of the stator windings under the influence of rated voltage of various types of overvoltages.

Partial discharges are usually the result of defects occurring in the insulation of the stator of electrical machines during its manufacture or as a result of operation. Over time, they destroy the molecular structures of the insulation and cause it to heat up. At the same time, the rate of insulation destruction depends on the type of insulation and its properties and can last from several months to several years. In practice, to protect the insulation from surface damage, the surface of the stator windings is coated with a semi-conducting coating.

However, quite often the causes of CR formation in the stator insulation winding with intact insulation are surface contamination of the stator winding, as well as the appearance of moisture on it.

In this regard, the article discusses such sections of this phenomenon as the nature of partial discharge, causes, types, internal discharges, internal stratifications, as well as detachment from the conductor, discharges in the frontal parts and discharges in the groove, electrically conductive particles, their signs, parameters and consequences of partial discharges.

Keywords: Electrical machines, stator winding, winding insulation, spark discharge, partial discharges.

FTAMP 44.39.29

<https://doi.org/10.48081/BMFY9640>

***Г. С. Нұрмағанбетова¹, В. В. Каверин²,
Г. А. Эм³, С. С. Исенов⁴, В. М. Дружинин⁵**

^{1,4}С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Қазақстан Республикасы, Астана қ.

^{2,3}Абылқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қазақстан Республикасы, Қарағанды қ.,

⁵Қарағанды индустриалды университеті, Қазақстан Республикасы, Теміртау қ.

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9529-2477>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2021-7445>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2639-0492>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4576-4621>

⁵ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7261-8780>

*e-mail: g_sahitovna@mail.ru

ЖЕЛ ТУРБИНАСЫНЫҢ ЭЛЕКТР МЕХАНИКАЛЫҚ БӨЛІГІНДЕГІ ҚЫСҚА ТҰЙЫҚТАЛУ РЕЖИМДЕРІН МАТЕМАТИКАЛЫҚ ЖӘНЕ ИМИТАЦИЯЛЫҚ МОДЕЛДЕУ

Энергиямен жабдықтау құрылымындағы жел энергетикасы үлесінің тұрақты өсуі аясында жел турбиналарының, атап айтқанда, редукторсыз конструкциялардың сенімділігін арттыруға бағытталған зерттеулер ерекше маңызға ие. Редукторсыз турбиналар жеңілдетілген механикалық схемамен және пайдалану шығындарының төмендеуімен ерекшеленеді, бірақ олар сыртқы жүктеменің ауытқуларына және динамикалық әсерлерге сезімтал. Мақалада жел турбина генераторының қуат тізбегіндегі қысқа тұйықталу режимдерін зерттеудің қажеттілігі қарастырылған. Қуаты 40 кВт - қа дейінгі жел турбинасының электромеханикалық бөлігінің математикалық моделінің теңдеулерін таңдау жүзеге асырылды және дәлелденді. Қысқа тұйықталу кезіндегі динамикалық процестерді зерттеу үшін қолданбалы бағдарламалар пакеті MATLAB/Simulink-те жел турбинасының электромеханикалық бөлігінің математикалық және имитациялық модельдері жасалды.

Имитациялық модельдеуде үш фазалы екі жартылай периодты түзеткіштің инерция моменттері, кедергілері мен коммутациялық қасиеттері ескерілді. Бос жүріс және жүктеме режимдеріндегі өтпелі процестердің теориялық және эксперименттік түрде алынған нәтижелері салыстырылды. Модельдеудің максималды қателігі үдеткіштің бастапқы кезеңдерінде 10% - дан аспайтыны және тұрақты режимде 1,5% - ға дейін төмендейтіні анықталды, бұл модельдің инженерлік есептеулер мен қысқа тұйықталу режимдерін талдауға сәйкестігін растайды.

Кілтті сөздер: жел турбинасы, қысқа тұйықталу, имитационды модельдеу, математикалық модель, өтпелі процестер, үш фазалы түзеткіш.

Кіріспе

Энергетиканы дамытудың қазіргі кезеңінде жел турбиналарын пайдалану арқылы өндірілетін электр энергиясы үлесінің тұрақты өсу үрдісі байқалады. Соңғы 20 жылда жаңадан енгізілетін заманауи жел турбиналары санының жыл сайынғы тұрақты өсуі байқалуда [1, 1 - 6].

Қуаты 40 кВт жоғары жел турбиналары, әдетте, жалпы электрмен жабдықтау жүйесінде жұмыс істейді, ал қуаты 40 кВт қа дейінгі қондырғылар негізінен автономды энергия жүйелерінде қолданылады.

Қуаты 40 кВт-тан төмен қазіргі заманғы жел турбиналарында редукторсыз типтегі сериялық өнімдердің санының арту үрдісі байқалады, бұл олардың сенімділігі мен техникалық-экономикалық көрсеткіштерін едәуір жақсарттады. Қуаты 40 кВт-тан төмен жел турбиналарының қосымша конструктивтік ерекшелігі – жел жылдамдығына байланысты турбина қанатының айналу жазықтығына көлбеу бұрышын автоматты түрде түзету жүйесінің болмауы болып табылады. Бұл жағдайда желдің жылдамдығына байланысты генератордың шығысындағы кернеу жиілігі мен амплитудасы өзгереді. Жүктеме тізбегінде инвертордың болуы кернеудің амплитудасы мен жиілігін тұрақтандыруды қамтамасыз етеді [2; 3; 4].

Жел турбиналарын жобалау кезінде қоршаған ортаның биосферасына теріс әсерді азайту және инновациялық техникалық шешімдердің тиімділігін арттыру, сондай-ақ климаттық жағдайлардың олардың сенімділігіне әсерін азайту мәселелері шешіледі [5; 6; 7].

Жел турбиналары өндіретін электр энергиясының қымбаттығына қарамастан, көміртегі және ядролық электр станциялары өндіретін энергияның өзіндік құнымен салыстырғанда, қазіргі уақытта жаңадан енгізілетін жел турбиналары мен олардың сенімділігін арттыруға және

өндірілетін электр энергиясының өзіндік құнын төмендетуге бағытталған ғылыми-техникалық әзірлемелердің тұрақты өсуі байқалады.

Жел турбиналарын ұзақ пайдалану процесінде жел турбиналарының сенімділігі мен апатсыз ұзақ мерзімді жұмысына теріс әсер ететін факторлардың жиынтығы анықталды. Жел турбинасының максималды өндірілетін қуатын қамтамасыз ететін желдің ең қолайлы сипаттамалары жағалау теңіз аймағында байқалады. Жоғары ылғалдылықтың, қоршаған ауадағы тұздың жоғары концентрациясының болуы, сондай-ақ жағалау аймағындағы температураның айтарлықтай өзгеруі жел турбиналарының сенімділігіне айтарлықтай теріс әсер етеді [8; 9; 10].

Тұрақты магниттердегі үш фазалы айнымалы кернеу генераторы бар редукторсыз типтегі жел турбиналарында генератор қысқыштарындағы кернеу және оның жиілігі генератор білігінің бұрыштық айналу жылдамдығына пропорционалды түрде тәуелді. Жел жылдамдығының 5 – 20 м / с жұмыс диапазонында кернеу 10 – 48 В диапазонында, сондай – ақ 50 – 250 Вольтта өзгереді, генератор қысқыштарындағы кернеу жиілігі ГН сериялы жел турбиналары үшін 30-120 Гц диапазонында өзгереді.

Жел турбиналарында генератордан электр энергиясы желдің бағытына байланысты айналатын жел турбинасының гондоласынан қозғалмайтын мұнараға үш фазалы электр энергиясын беруді қамтамасыз ететін жылжымалы байланыс құрылғысы арқылы беріледі. Бұдан әрі электр энергиясы тарату құрылғысына дейін кабельдік өнім арқылы беріледі. Жел турбинасын ұзақ уақыт пайдалану кезінде климаттық факторлардың әсерінен жел турбинасының үш фазалы электр беру жүйесінің элементтерінде қысқа тұйықталу ықтималдығы жоғары болады.

Тұздың жоғары концентрациясы бар жоғары ылғалдылық, қоршаған орта температурасының жиі өзгеруі, жел турбинасы құрылымының дірілі, сондай-ақ найзағай разряды және жел турбинасының коммутациялық кернеуі сияқты факторлар электр қуатының сенімділігін төмендетеді. Жоғарыда аталған факторлар электр кабелінің оқшаулауының бұзылуына және нәтижесінде жел турбинасының электр жабдықтарының электр тізбегінде қысқа тұйықталудың пайда болуына әкеледі. Көп жағдайда электр қуатының қысқа тұйықталуы өртке әкелуі мүмкін [11, 775-776 – бб.].

Электр энергиясын жел турбинасының генераторынан түрлендіргішке беру кезінде электр кабеліндегі қысқа тұйықталу режиміндегі динамикалық процестерді зерттеу мақсатында редукторсыз типтегі жел турбинасының электр жабдықтарындағы қысқа тұйықталу режимдерін теориялық зерттеудің маңыздылығын анықтау; жел турбинасының электромеханикалық бөлігінің математикалық және имитациялық модельдерін жасау; теориялық және

эксперименттік зерттеулер процесінде алынған өтпелі процестерді салыстыру арқылы имитациялық модельдің сәйкестігін бағалауды орындау қажет.

Материалдар мен әдістері

Редукторсыз типті жел турбинасының роторымен құрылатын аэродинамикалық қуат P_a теңдеуі келесі түрде болады:

$$P_a = C_p(z) \frac{\rho S V^3}{2} \quad 1$$

мұндағы: $C_p(z)$ – жел энергиясын пайдалану коэффициенті; ρ – ауа тығыздығы; S – турбина қалақтарының бағаланатын жиынтық ауданы; V – желдің жылдамдығы.

Ротормен құрылатын момент (2) теңдеумен анықталады:

$$M_a = \frac{P_a}{\omega} \quad 2$$

мұндағы ω – ротор білігінің бұрыштық жылдамдығы.

Генератор білігіндегі моменттердің тепе-тендік теңдеуі келесі теңдеумен сипатталады:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_a - M_{эм} - M_c \quad 3$$

мұндағы J – инерция моменті; $M_{эм}$ – генератордың электромагниттік моменті; M_c – үйкелісті және басқа шығындарды ескеретін жоғалтулардың кедергі моменті.

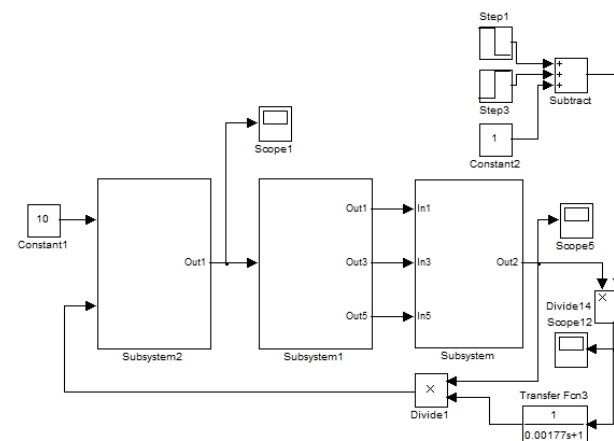
Тұрақты магниттері бар үш фазалы генератордың математикалық моделін құру кезінде келесі болжамдар қабылданды: өндірілетін электр энергиясының кернеулерінің амплитудалық мәндері, сондай – ақ үш фазаның белсенді кедергісі мен индуктивтілігінің шамалары бірдей.

Тұрақты магниттері бар үш фазалы генератордың теңдеулер жүйесі келесі түрде жазылады:

$$\begin{cases} U_{(A,B,C)} = e_{(A,B,C)} - R_A i_{(A,B,C)} - L_A \frac{di_{(A,B,C)}}{dt} \\ e_A = k\omega \sin(2p\omega t) \\ e_B = k\omega \sin\left(2p\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \\ e_C = k\omega \sin\left(2p\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases}$$

мұндағы: $e_{(A,B,C)}$ – генератор орамасының әр фазасында қозғалатын электр қозғаушы күш; $i_{(A,B,C)}$ – генератордың фазалық орамасының тогы; R_A, L_A – генератордың фазалық орамасының белсенді кедергісі және индуктивтілігі; $U_{A,B,C}$ – генератордың шығыс қысқыштарындағы фазалық кернеу; k – конструктивті тұрақты; $2p$ – полюс жұптарының саны.

Жел турбинасындағы динамикалық процестерге теориялық зерттеулер жүргізу мақсатында 1-4 теңдеулер негізінде жел турбинасының электромеханикалық бөлігінің имитациялық моделі жасалды. Имитационды модельдеу MATLAB қолданбалы бағдарламалар пакетін қолдана отырып жасалған (1 сурет).



1 сурет – Жел турбинасының имитационды моделі

Имитационды модельді әзірлеу барысында келесі болжамдар қабылданды - жел турбинасының электромеханикалық бөлігіндегі динамикалық процестерді зерттеу кезінде бүкіл эксперимент жүргізілген уақыт аралығында жылдамдықтың шамасы тұрақты болды. Жел жылдамдығының шамасы Constant 1 блогының параметрлерімен берілген.

Ротордың бұрыштық жылдамдығының, түзеткіш шығысындағы кернеудің және жүктеме тогының динамикалық өзгерістері Scope 1, Scope 5 және Scope 12 осциллографтары осциллографтары көмегімен жүзеге асырылды.

Имитационды модельдеу сәйкестігі екі технологиялық режимде, яғни жел турбинасының үдеткіш режимінде және Subsystem басқарылмайтын екі жартылай периодты үш фазалы түзеткіштің шығысындағы жүктеме

кедергісінің сатылы өзгеру режимінде бағаланды. Жел жылдамдығының шамасы Constant 1 блогының параметрлерімен берілген.

Жел турбинасының генератордың электр жүктемесінің сатылы әсеріне реакциясы блоктармен модельденеді-Constant 2, Step 1, Step 3 және Subtract.

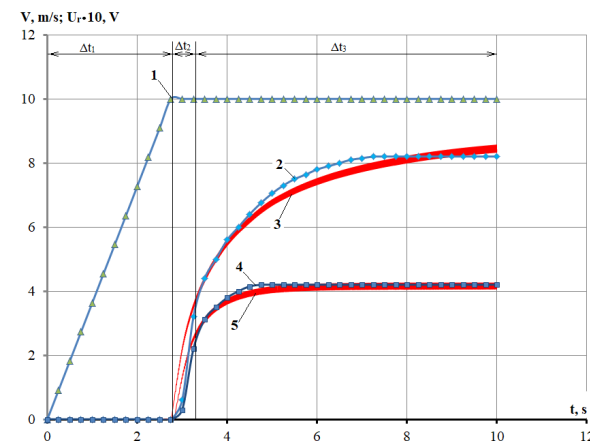
Генератордың электрлік жүктемесіне сатылы әсер ету кезіндегі жел турбинасының реакциясы Constant 2, Step 1, Step 3 и Subtract модельдеу блоктары арқылы жүзеге асырылады. Жүктеме кедергісін ескере отырып, генератордың жүктеме тогы Divide 14 блогымен модельденеді. Функционалды аяқталған модель блоктарына тасымалдау ережелерін қолдана отырып - генератордың статор орамаларының үш фазасының әрқайсысының инерциясын модельдейтін инерциясыз екі жартылай периодты үш фазалы түзеткіш және аперидотты буын Transfer Fcn 3 блогымен модельденеді.

Үш фазалы екі жартылай периодты түзеткіштің жұмыс ерекшелігі - оның коммутациялық қасиеттері болып табылады, оған үш фазалы кернеу көзінің үш фазасының әрқайсысы арасында жүктемені кезекпен қосу жатады. Осыған байланысты Transfer Fcn 3 аперидотты буыны әр фазаға кезектесіп қосылады. Қысқа тұйықталу режимінде пайда болатын электр доғасы негізінен жылу процестерімен сипатталатындықтан, бұл жағдайда жүктеме тек белсенді компонент болып табылады. Жүктеме арқылы тұтынылатын электр қуатының шамасы Divide 1 блогымен есептелді. Жүктеме арқылы тұтынылатын Р қуатының белсенді шамасы $P=U_i$ өрнегінен есептелді, мұндағы U және i үш фазалы екі жартылай периодты түзеткіштің жүктеме кернеуі мен тогы, ол генератордың электрлік қуат тізбегінде орналасқан Subsystem блогы.

Жел турбинасының механикалық бөлігінің имитациялық моделін құру мақсатында (3) теңдеу интегралды түрде бейнеленген. Ротордың имитациялық моделі 1 суретте көрсетілген Subsystem 2 блогымен ұсынылған.

Сәйкестікті бағалау жел турбинасының бос жүріс үдеткіші процесінде (2 және 3 осциллограммалар) және жүктеме кезінде (4 және 5 осциллограммалар) өтпелі процестерді салыстыру арқылы жүзеге асырылды (2 сурет).

Δt_1 уақыт аралығында асинхронды электр қозғалтқышы М және басқарылатын А1 жиілік түрлендіргіші арқылы желдің жылдамдығын 10 м/с дейін сызықтық заң бойынша арттыру жүзеге асырылды. Осы уақыт аралығында жел турбинасы механикалық түрде тежелді. Δt_2 және Δt_3 уақыт аралықтарында жел ағынының жылдамдығы өзгеріссіз қалды. Тежелу тоқтағаннан кейін жел турбинасы үдетілді. Тәжірибе арқылы алынған жел турбинасының үдеткіш өтпелі процестері бос жүріс кезінде (2 позиция) және жүктеме кезінде (4 позиция) 2 суретте көрсетілген.



2-сурет–Жел турбинасын үдету кезіндегі өтпелі процесстер

Нәтижелер және талқылау

Имитационды модельдеу сәйкестігін бағалау мақсатында (1 сурет) жел жылдамдығы мен жүктеме шамасының ұқсас мәндері үшін имитациялық эксперименттер орындалды. Имитационды эксперименттер процесі кезінде алынған жел турбинасын үдету өтпелі процестері, бос жүріс кезінде (3 позиция) және жүктеме кезінде (5 позиция) 2 суретте көрсетілген. Желдің жылдамдығы 10 м/с – қа жеткеннен кейін Δt_2 уақыт аралығында жел турбинасы тежелуден босатылды да бұрыштық жылдамдықтың өсуі басталды, нәтижесінде түзеткіштің шығысындағы кернеу артты. Бұл аралықта басқарылмайтын үш фазалы түзеткіштің шығыс қысқыштарындағы кернеудің өтпелі процесінің қателігінің максималды мәні (3 позиция, 2 сурет) 18%-дан аспайды, ал жүктеме кезінде 10% - дан аспайды. Жел турбинасының үдеуінің бастапқы кезеңіндегі қатенің артуы Subsystem 2 (1 сурет) моделінде Жел энергиясын пайдалану коэффициентінің шамасының жел турбинасының бұрыштық айналу жылдамдығына тәуелділігінің болмауымен түсіндіріледі. Модельде жел энергиясын пайдалану коэффициентінің еі тиімді мәні қолданылады. Δt_3 уақыт аралығында модельдеу қателігі 3% - дан аспайды, ал жүктеме кезінде 1,5 % құрайды, бұл инженерлік есептеулерге қойылатын талаптарды толығымен қанағаттандырады.

Қаржыландыру туралы ақпарат

Ғылыми жұмысты Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитеті қаржыландырды, ЖТН №AP19677354 «Жел электр станцияларының асинхронды генераторларын жанама жылудан қорғау жүйелерін әзірлеу» жобасы шеңберінде орындалды.

Қорытынды

Қуаты 40 кВт - қа дейінгі жел турбиналарындағы қысқа тұйықталу режимін зерттеудің маңыздылығы апатсыз жұмыс істеу мерзімінің өсуімен мен пайдалану шығындарының төмендеуі арқылы анықталады. Теориялық зерттеулер барысында жел турбинасының математикалық және имитациялық модельдері әзірленді. Турбинаның үдеткіш режимдеріндегі өтпелі процестерді салыстыру арқылы имитациялық модельдің сәйкестігін бағалау жүргізілді. Имитациялық модельдеу нәтижелерінің қателігі, басқарушы және қоздырушы әсерлердің ұқсас мәндері үшін эксперименталды түрде алынған нәтижелерге қатысты, 10%-дан аспады. Теориялық және эксперименттік жолмен алынған өтпелі процестердің салыстыру нәтижелері негізінде, қысқа тұйықталу режимдерін зерттеу үшін имитациялық модельді қолдануға болады деген тұжырым жасауға болады.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

- 1 Kaverin, V., Nurmaganbetova, G., Em, G., Issenov, S., Tatkeyeva, G., Maussymbayeva, A. Combined Wind Turbine Protection System / *Energies* 2024, 17(20), 5074. <https://doi.org/10.3390/en17205074>. Published: 12 October 2024
- 2 Поваров, А. И. Возобновляемые источники энергии: Ветроэнергетика. – М. : Энергоатомиздат, 2017. – 296 с.
- 3 Heier, S. Grid Integration of Wind Energy: Onshore and Offshore Conversion Systems. – 4th ed. – Wiley, 2014. – 320 p.
- 4 Мещеряков, А. Н., Черепанов, А. Н. Ветроэнергетические установки: конструкция, расчёт и проектирование. – СПб. : Питер, 2020. – 352 с.
- 5 Hoen, B., Firestone, J., Rand, J. Attitudes of U. S. Wind Turbine Neighbors: Analysis of a Nationwide Survey. *Energy Policy*. Volume, November 2019. P. 1/27-27/27/
- 6 Bórawski, P., Beldycka-Bórawska, A., Jankowski, K. J., Dubis, B., Dunn, J. W. Development of wind energy market in the European Union. *Renewable Energy*. Volume 161 (December 2020) P. 691–700
- 7 Williamsa, E., Hittingerb, E., Carvalhoa, R., Williamsa, R. Wind power costs expected to decrease due to technological progress. *Energy Policy*. *Energy Policy*. 106 (2017) Pages 427–435
- 8 Li, D., Sang, Y., Lv, Z., Wu, K., Lai, Z. Dynamic response analysis of wind turbine tower with high aspect ratio: Wind tunnel tests and CFD simulation. *Thin-Walled Structures*. Volume 211, June 2025, Article number 113–113.
- 9 Li, W., Zhao, W., Li, J., Zhu, Q., Du, Y. Investigation on vibration behavior of onshore wind turbine tower based on long-term monitoring data. *Journal of*

Renewable and Sustainable Energy. Volume 17, Issue 21, March 2025, Article number 023303

10 Xue, Z., Zhou, Z., Lai, H., Shao, S., Rao, J., Li, Y., He, L., Jia, Z. Investigations on rigid–flexible coupling multibody dynamics of 5 MW wind turbine. *Energy Science and Engineering*. Volume 12, Issue 10, P. 4566 – 4581, October 2024.

11 Restás, Á., Lublóy, É. The effects causing the burning of plastic coatings of fire-resistant cables and its consequences. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* Volume 139, Issue 2, P. 775 – 7871, January 2020.

REFERENCES

- 1 Kaverin, V., Nurmaganbetova, G., Em, G., Issenov, S., Tatkeyeva, G., Maussymbayeva, A. Combined Wind Turbine Protection System / *Energies* 2024, 17(20), 5074. <https://doi.org/10.3390/en17205074>. Published: 12 October 2024
- 2 Povarov, A. I. *Vozobnovljjaemye istochniki jenerгии: Vetro-jenergetika [Renewable Energy Sources: Wind Energy]*. – М. : Jenergoatomizdat, 2017. – 296 p.
- 3 Heier, S. Grid Integration of Wind Energy: Onshore and Offshore Conversion Systems. – 4th ed. – Wiley, 2014. – 320 p.
- 4 Meshherjakov, A. N., Cherepanov, A. N. *Vetrojenergeticheskie ustanovki: konstrukcija, raschjot i proektirovanie [Wind Power Plants: Design, Calculation, and Engineering]*. – SPb.: Piter, 2020. – 352 p.
- 5 Hoen, B., Firestone, J., Rand, J. Attitudes of U.S. Wind Turbine Neighbors: Analysis of a Nationwide Survey. *Energy Policy*. Volume, November 2019. P. 1/27-27/27/
- 6 Bórawski, P., Beldycka-Bórawska, A., Jankowski, K. J., Dubis, B., Dunn, J. W. Development of wind energy market in the European Union. *Renewable Energy*. Volume 161 (December 2020) P. 691–700
- 7 Williamsa, E., Hittingerb, E., Carvalhoa, R., Williamsa, R. Wind power costs expected to decrease due to technological progress. *Energy Policy*. *Energy Policy*. 106 (2017) P. 427–435
- 8 Li, D., Sang, Y., Lv, Z., Wu, K., Lai, Z. Dynamic response analysis of wind turbine tower with high aspect ratio: Wind tunnel tests and CFD simulation. *Thin-Walled Structures*. Volume 211, June 2025, Article number 113113.
- 9 Li, W., Zhao, W., Li, J., Zhu, Q., Du, Y. Investigation on vibration behavior of onshore wind turbine tower based on long-term monitoring data. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*. Volume 17, Issue 21, March 2025, Article number 023303
- 10 Xue, Z., Zhou, Z., Lai, H., Shao, S., Rao, J., Li, Y., He, L., Jia, Z. Investigations on rigid–flexible coupling multibody dynamics of 5 MW wind

turbine. Energy Science and Engineering. Volume 12, Issue 10, Pages 4566 – 4581, October 2024.

11 Restás, Á., Lublőy, É. The effects causing the burning of plastic coatings of fire-resistant cables and its consequences. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry Volume 139, Issue 2, Pages 775 – 7871, January 2020.

30.06.25 ж. баспаға түсті.
08.07.25 ж. түзетулерімен түсті.
05.09.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

*Г. С. Нурмаганбетова¹, В. В. Каверин², Г. А. Эм³,
С. С. Исенов⁴, В. М. Дружинин⁵

^{1,4}Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, Республика Казахстан, г. Астана

^{2,3}Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, Республика Казахстан, г. Караганда,

⁵Карагандинский индустриальный университет, Республика Казахстан, г. Темиртау.

Поступило в редакцию 30.06.25
Поступило с исправлениями 08.07.25
Принято в печать 05.09.25

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ЧАСТИ ВЕТРОВОЙ ТУРБИНЫ

На фоне стабильного увеличения доли ветроэнергетики в структуре энергоснабжения особую значимость приобретают исследования, направленные на повышение надёжности ветровых турбин, в частности безредукторных конструкций. Безредукторные турбины отличаются упрощённой механической схемой и сниженным уровнем эксплуатационных затрат, однако они более чувствительны к колебаниям внешней нагрузки и динамическим воздействиям. В статье обоснована необходимость проведения исследований коротких замыканий в силовой части генератора ветровых турбин. Реализован и обоснован выбор уравнений математической модели электромеханической части ветровой турбины мощностью до 40 кВт. Для исследования динамических процессов при коротком замыкании разработаны математическая и имитационная модели электромеханической части ветровой турбины в пакетах

прикладных программ MATLAB/Simulink. Имитационная модель включает учёт моментов инерции, сопротивлений и коммутационных свойств трёхфазного двухполупериодного выпрямителя. Проведено сопоставление переходных процессов, полученных теоретически и экспериментально, при различных режимах работы: на холостом ходу и под нагрузкой. Установлено, что максимальная погрешность моделирования не превышает 10% на начальных этапах разгона и снижается до 1,5% в установившемся режиме, что подтверждает адекватность модели для инженерных расчётов и анализа режимов короткого замыкания.

Ключевые слова: ветровая турбина, короткое замыкание, имитационное моделирование, имитационная модель, переходные процессы, трёхфазный выпрямитель.

*G. S. Nurmaganbetova¹, V. V. Kaverin², G.A. Em³,
S. S. Issenov⁴, V.M. Druzhinin⁵

^{1,4}Kazakh Agrotechnical Research University named after S. Seifullin, Republic of Kazakhstan, Astana

^{2,3}Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Republic of Kazakhstan, Karaganda,

⁵Karaganda Industrial University, Republic of Kazakhstan, Temirtau
Received 30.06.25

Received in revised form 08.07.25

Accepted for publication 05.09.25

MATHEMATICAL AND SIMULATION MODELING OF SHORT- CIRCUIT MODES IN THE ELECTROMECHANICAL PART OF A WIND TURBINE

Against the backdrop of a steady increase in the share of wind energy in the energy supply structure, research aimed at improving the reliability of wind turbines, particularly gearless designs, is becoming increasingly important. Gearless turbines have a simplified mechanical design and lower operating costs, but they are more sensitive to external load fluctuations and dynamic effects. The article substantiates the need to conduct research on short circuits in the power part of wind turbine generators. The choice of equations for the mathematical model of the electromechanical part of a wind turbine with a capacity of up to 40 kW has been implemented and justified. To study dynamic processes during a short circuit, a mathematical and simulation model of the electromechanical part of a wind turbine was

developed using MATLAB/Simulink software packages. The simulation model takes into account the moments of inertia, resistances, and switching properties of a three-phase half-wave rectifier. The transient processes obtained theoretically and experimentally were compared under different operating modes: at idle speed and under load. It has been established that the maximum modeling error does not exceed 10 % in the initial stages of acceleration and decreases to 1.5 % in the steady-state mode, which confirms the adequacy of the model for engineering calculations and analysis of short-circuit modes.

Keywords: wind turbine, short circuit, simulation modeling, simulation model, transients, three-phase rectifier.

МРНТИ 44.37.01

<https://doi.org/10.48081/YXXO4279>

***Б. А. Нурсеитов¹, Е. Хидолда², А. О. Бердибеков³,
Н. О. Марап⁴**

^{1,2,3,4}Satbayev University, Республика Казахстан, г. Алматы

¹ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-0714-9871>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7590-8134>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5943-432X>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-3324-0260>

*e-mail: barakat_86@mail.ru

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ АВТОНОМНОЙ МАЛОЙ СОЛНЕЧНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

С учетом увеличивающегося энергопотребления в Казахстане и возрастающего интереса к экологическим вопросам, возобновляемые источники энергии, особенно солнечная энергетика, становятся ключевым элементом устойчивого развития энергетического сектора. Автономные малые солнечные электростанции (СЭС) являются перспективным решением для обеспечения электроэнергией удалённых территорий, где подключение к централизованным сетям невозможно или нецелесообразно. Однако их эксплуатация сопряжена с рядом проблем, таких как переменность генерации энергии, зависимость от погодных условий и необходимость эффективного управления накопителями энергии. В данном исследовании представлена разработка и анализ имитационной модели малой автономной СЭС с использованием программных средств Matlab/Simulink. Модель учитывает влияние внешних метеорологических факторов, таких как интенсивность солнечной радиации, температура воздуха и облачность, на работу фотоэлектрических панелей. В её состав входят блоки моделирования солнечного излучения, фотоэлектрического элемента, системы накопления энергии, преобразователя постоянного тока (boost-конвертера) и автономного инвертора. Результаты моделирования показали адекватность работы разработанной системы в условиях переменной солнечной инсоляции и нагрузки. Проведённый анализ позволяет оптимизировать параметры системы,

в том числе мощность солнечных панелей, ёмкость аккумуляторных батарей и настройки регуляторов преобразователей. Использование имитационного моделирования даёт возможность прогнозирования режимов работы СЭС и выбора рациональных стратегий её эксплуатации, что повышает надёжность и эффективность функционирования автономных энергетических систем.

Ключевые слова: солнечные панели, инверторы, аккумуляторы, моделирование, повышающий преобразователь, ПИ регулятор.

Введение

В условиях роста потребления электроэнергии Казахстана на 2030 год на 151,2 млрд кВт·ч [1] (23,9 %) и повышенный интерес к вопросам охраны окружающей среды [2], возобновляемые источники энергии (ВИЭ) становятся важным элементом устойчивого энергетического развития [3]. Среди них солнечная энергетика занимает одно из ведущих мест [4] благодаря своей экологической чистоте, доступности и постоянному снижению стоимости оборудования. Малые автономные СЭС находят широкое применение в удалённых районах, где подключение к централизованным сетям экономически нецелесообразно или технически невозможно.

Проектирование и эксплуатация автономных СЭС сопряжены с рядом трудностей, связанными с переменной генерацией энергии, обусловленной погодными условиями, и необходимостью эффективного управления накопителями [5]. В этих ситуациях имитационное моделирование становится мощным инструментом для анализа и оптимизации работы СЭС. Оно позволяет имитировать сложные динамические процессы системы, учитывать влияние внешних факторов и разрабатывать стратегии управления для повышения эффективности и надёжности работы СЭС.

Целью данной работы является разработка и исследование имитационной модели системы автономной малой СЭС. В статье рассматриваются основные компоненты модели, методы её реализации, а также проводится анализ поведения системы в различных эксплуатационных условиях. Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации проектных решений и повышения эффективности эксплуатации автономных солнечных энергетических установок.

Материалы и методы

Количество солнечной энергии поступающей на поверхность фотоэлектрических (PV) панели зависит от интенсивности солнечного излучения, географического местоположения, пространственной ориентации панели, а также метеорологических факторов таких как: температура воздуха, облачность, альбедо и прозрачность атмосферы.

Однако уровень солнечной энергии G , поступающей на PV панель с произвольным наклоном может определяться соотношением

$$G = G_{\text{пр}} \cos \theta \quad (1)$$

где θ – угол падения прямого солнечного излучения, $G_{\text{пр}}$ – прямое солнечное излучение попадающий на горизонтальную поверхность измеряемое через пиранометр.

Величина угла θ является сложной функцией несколько переменных [6], то есть

$$\theta = f(n, \varphi, \psi, \omega, \text{utc}, \beta, \gamma, t) \quad (2)$$

где n – порядковый номер дня, φ – широта местности, ψ – долгота местности, ω – часовой угол, utc – часовой пояс по Гринвичу, β – угол наклона PV панели, γ – азимутальный угол, t – время.

На рисунке 1 представлена реализация вычислений системы уравнений (1), (2) в виде функционального блока из библиотеки Matlab/Simulink с возможностью ввода исходных данных. Величины по максимальному значению $G_{\text{пр}}$ в течение суток получены от стационарного пиранометра CMP6 (Kipp & Zonen) при кафедре «Энергетика» Satbayev University.

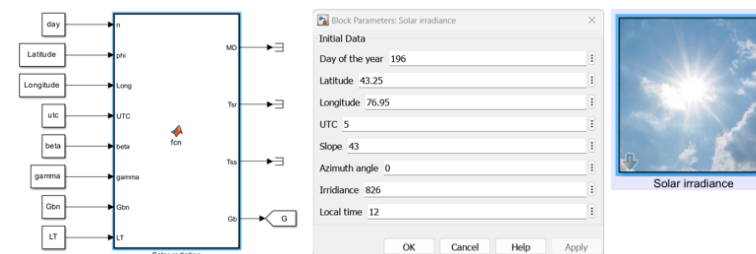


Рисунок 1 – Модель расчета солнечной радиации

Модель позволяет определять текущие значения солнечной радиации G в ясный солнечный день на произвольно ориентированные PV поверхности для любого дня года, а также выполнить сравнительную анализ по сезонам года. В качестве выходных параметров от блока кроме величины солнечной радиации являются продолжительность светового дня, время восхода и заката солнца.

Блок PV панели реализована из библиотеки Simscape/Electrical/Specialized Power Systems [7] и представляет собой пятипараметрическую модель, где иллюстрирован на рисунке 2, использующую источник генерируемого светом тока I_L , диод, последовательное сопротивление R_s и шунтирующее сопротивление R_{sh} для представления зависящих от солнечной радиации и температуры вольтамперных характеристик элементов. Ввод параметров осуществляется через маскированную подсистему и показан на рисунке 3.

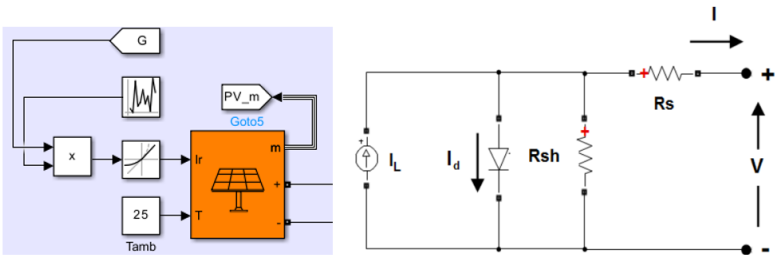


Рисунок 2 – Модель PV панели

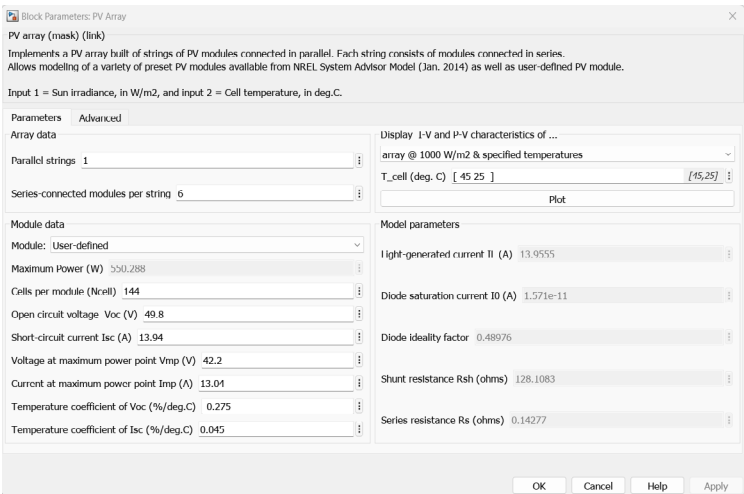


Рисунок 3 – Окно ввода параметров PV панели

Для верификации PV модели использованы параметры монокристаллического солнечного панели RSM144-9-550M [8] которые показаны в таблице 1 в количестве 6 шт. при кафедре «Энергетика» Satbayev University.

Таблица 1 – Параметры солнечной панели RSM144-9-550M

№	Параметры	Переменные	Величины
1	Максимальная мощность при STC	P_m	550 Вт
2	Максимальное напряжение	V_{mp}	42,2 В
3	Максимальный ток	I_{mp}	13,04 А
4	Напряжение разомкнутой цепи	V_{oc}	49,8 В
5	Ток короткого замыкания	I_{sc}	13,94 А
6	Ячейки на элемент	N_s	144
7	Температурный коэффициент по V_{oc}	K_v	-0.275 %/ °C
8	Температурный коэффициент по I_{sc}	K_i	0.045 %/ °C
9	Количество панели	N	6 шт.

В таблице 2 предоставлено сравнение данных, полученных от модели и с данными завода изготовителя и показала лучшее соответствие результатов, что обеспечивает высокую точность имитации. На рисунке 4 показан моделированный ВАХ панели при STC.

Таблица 2 – Сравнение значений эталонной модели и значений модели в STC.

Параметры	Параметры PV панели RSM144-9-550M	Параметры при моделировании	Относительная погрешность, %
P_{max} , Вт	550	550	0,0
V_{oc} , В	49,8	49,8	0,0
I_{sc} , А	13,94	13,94	0,0
V_{mp} , В	42,2	42,2	0,0
I_{mp} , А	13,04	13,04	0,0

Для стабилизации напряжения в шинах постоянного тока после PV панели использован повышающий стабилизатор (boost converter) с ПИ регулятором. В качестве ключа применен полевой транзистор с

изолированным затвором (MOSFET), имеющий наилучший динамические свойства при повышенной частоте коммутации [9]. На рисунке 5 показан модель boost конвертера с широтно-импульсной модуляции (PWM) с частотой коммутации 5 кГц. Коэффициенты ПИ регулятора получены опытным путем и составляет $K_i=1,5$, $K_p=0,8$ где ошибка регулирования по напряжению имела $\pm 4\%$ что вполне пригодно для моделирования в целом. Блок PWM генератора выдает импульс для включения MOSFET транзистора и рабочий цикл генератора определяется входом D (скважность). Значение от 0 до 1 определяет процентную долю периода импульсов, в течение которого включен выходной сигнал.

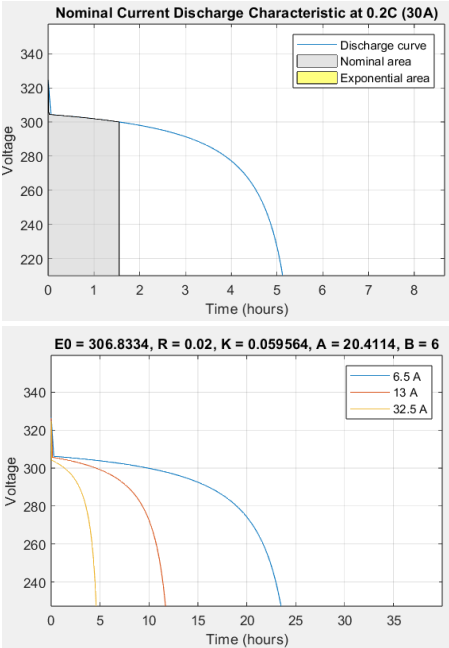


Рисунок 4 – BAX моделированного панели

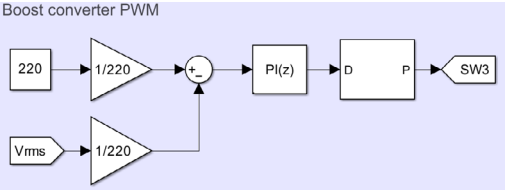


Рисунок 5 – Модель повышающего (boost) конвертера

Входное напряжение от PV панели через фильтрующий конденсатор C1 прикладывается к последовательно включенному дросселю L1 и ключевому транзистору VT1. К средней точке соединения этих элементов подключен диод VD1, к другому выводу которого подключается выходной конденсатор C2. Ключевой транзистор VT1 работает в импульсном режиме с переменной частотой преобразования в зависимости от регулятора. Расчет параметров пассивных элементов произведен исходя из нагрузки, пульсации и частоты коммутации [10] и выведена в таблице 3.

Таблица 3 – Параметры пассивных элементов boost конвертера.

Параметры	Величины
C1	1000 мкФ
L1	0,38 мГн
C2	1000 мкФ

После boost конвертера следует модель накопителя (свинцово-кислотный аккумулятор), который обеспечивает «демпфер» в переходных режимах и резервный источник питания (backup). На рисунке 6 показан модель и параметры аккумулятора из библиотеки Simscape/Electrical/Specialized Power Systems/Sources. В качестве исходных данных взятые из спецификации аккумулятора Challenger A12-120, 12B, 150Ah [11] при кафедре «Энергетика» Satbayev University. Блок аккумулятора реализует общую динамическую модель, которая представляет наиболее популярные типы перезаряжаемых батарей.

Преобразования постоянного тока в переменный с промышленной частотой 50 Гц синусоидальной формы осуществляется автономным (независимым) инвертором. В роли ключей использованы биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT) в виде H-моста.

Функциональная схема управления мостом, реализующая симметричное PWM управление и модель инвертора показана на рисунке 7.

Генератор пилообразного напряжения (ГПН), тактируемый блоком Repeating Sequence, вырабатывает (пилообразное напряжение) с несущей частотой 4 кГц. А в качестве модулирующей частоты реализованная в блоке Sine Wave использовалось 50 Гц, так как частота модулирующего сигнала задает частоту на выходе инвертора.

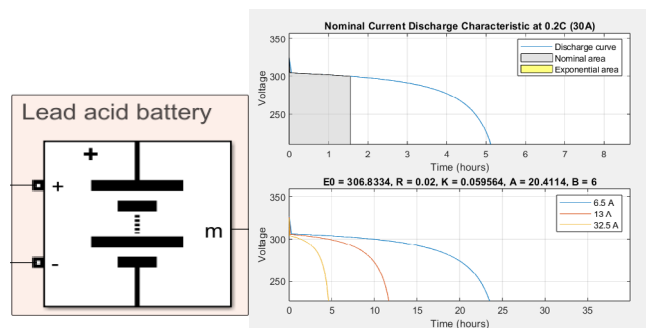


Рисунок 6 – Модель и разрядная характеристика аккумулятора

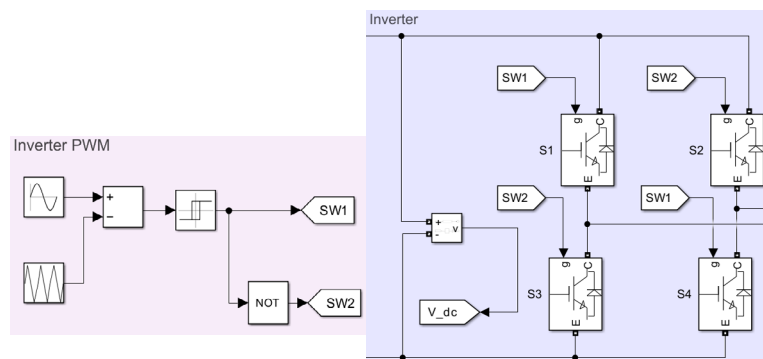


Рисунок 7 – Модель автономного инвертора

Последними моделями, которые показаны на рисунке 8 являются фильтры низких частот (ФНЧ) в виде LC - фильтров с учетом внутренних потерь и активная нагрузка с возможностью переключения в разные сопротивления для изучения переходных режимов.

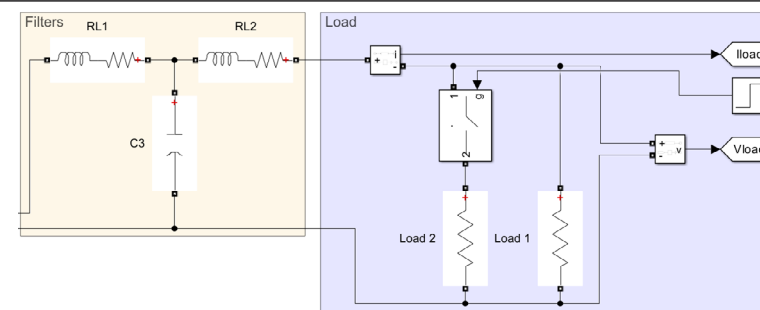


Рисунок 8 – Модель ФНЧ и нагрузки

Результаты и обсуждение

Рассмотрим результаты моделирования рабочих режимов малой солнечной электростанции, территориально расположенной в г. Алматы, при кафедре «Энергетика» Satbayev University (географические координаты 43,25° С.Ш., 76,95 В.Д.) для зимнего дня (26 декабря) года.

В качестве объекта исследования принята имитационная модель, показанная на рисунке 9. В ее состав входит PV панели, состоящая из 6 фотоэлектрических элементов монокристаллического типа RSM144-9-550M [8], номинальной мощностью 550 Вт, соединенных в массив из 6 последовательных цепочек по 144 элемента в каждой. Накопители построены на базе 25 гелевых свинцово-кислотных аккумуляторов (AGM) Challenger A12-120, 12B, 150Ah [11]. Номинальное напряжение каждого AGM принято равным $U_{ном}=12В$, что в сумме при последовательном соединении их получим 300В при емкости 150А·ч. В рассматриваемой модели ориентация PV панели задается вручную через маскированную подсистему. Исходными данными моделирования являлись показания полученные от метеостанции Davis и пиранометра CMP6 при кафедре «Энергетика» Satbayev University.

При выполнении моделирования приняты средние значения температуры окружающего воздуха, полученные в результате обработки данных от метеостанции.

На рисунке 10 приведены смоделированные графики режимных параметров малой солнечной электростанции для рассматриваемого дня. Чтобы симулировать модель из компонентов Simscare применен блок Powergui с дискретизации 1 мс для обеспечения высокую скорость моделирования силовой электроники с частотой коммутации 5 кГц. Продолжительность моделирования составляет 1 сек.

Начальная солнечная инсоляция полученная от блока Solar Irradiance поступает в блок Uniform Random Number, где она имеет случайный характер

описывающий облачность неба. В связи изменением солнечной инсоляции соответственно изменяются ток и мощность PV панели подключенная к нагрузке, а напряжение меняется согласно ВАХ панели. Дефицит мощности, возникающий во время переменной облачности, восполняется аккумулятором, который подключен между boost конвертором и инвертором.

График солнечной инсоляции (рисунок 10а) демонстрируют ступенчатое изменение интенсивности в диапазоне от 150 до 580 Вт/м², что позволяет оценить реакцию модели на колебания метеорологических условий. При этом напряжение на выходе фотоэлектрической панели (рисунок 10б) стабилизируется на уровне около 290 В с отклонениями, не превышающими 2 %. Изменения тока панели (рисунок 10в) и генерируемой мощности (рисунок 10г) демонстрируют пропорциональную зависимость от уровня инсоляции, что подтверждает физическую достоверность модели и правильность энергетических преобразований.

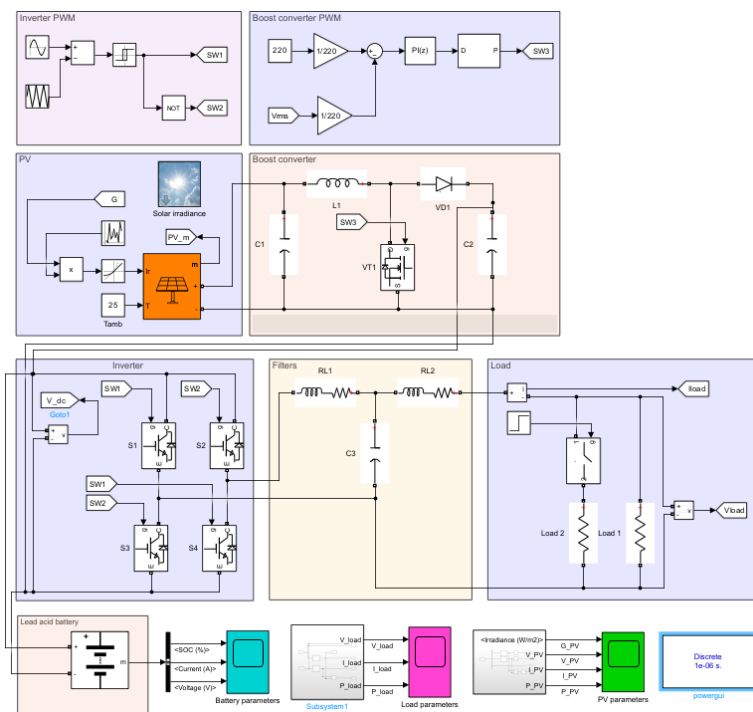
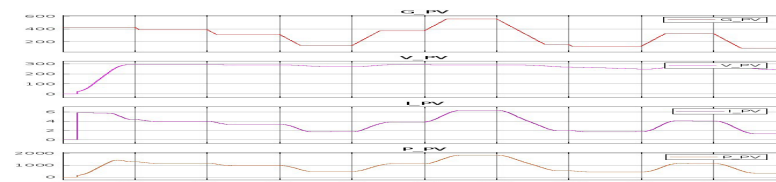
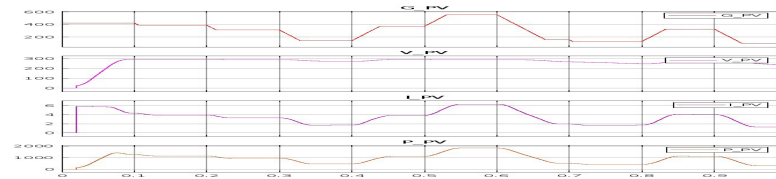


Рисунок 9 – Модель малой солнечной электростанции

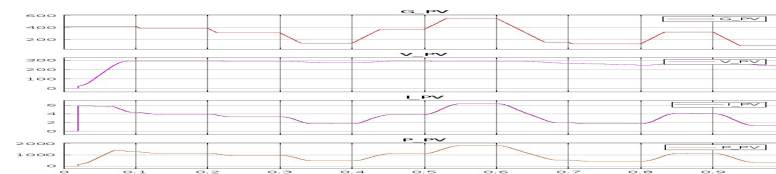
Дополнительно, устойчивость системы при изменении нагрузки подтверждается анализом графиков выходных характеристик. При резком скачке мощности нагрузки с 2360 Вт на 4660 Вт в $t = 0.5$ с, напряжение на нагрузке (рисунок 10д) сохраняется практически неизменным на уровне 220 В. Отсутствие переходных процессов и пиковых колебаний при этом указывает на устойчивую работу системы в условиях ступенчатого возмущения со стороны потребителя. Рост тока нагрузки (рисунок 10е) происходит синхронно с изменением мощности, а сам процесс характеризуется минимальными колебаниями, что свидетельствует о высокой динамической устойчивости схемы преобразования энергии.



а)



б)



в)

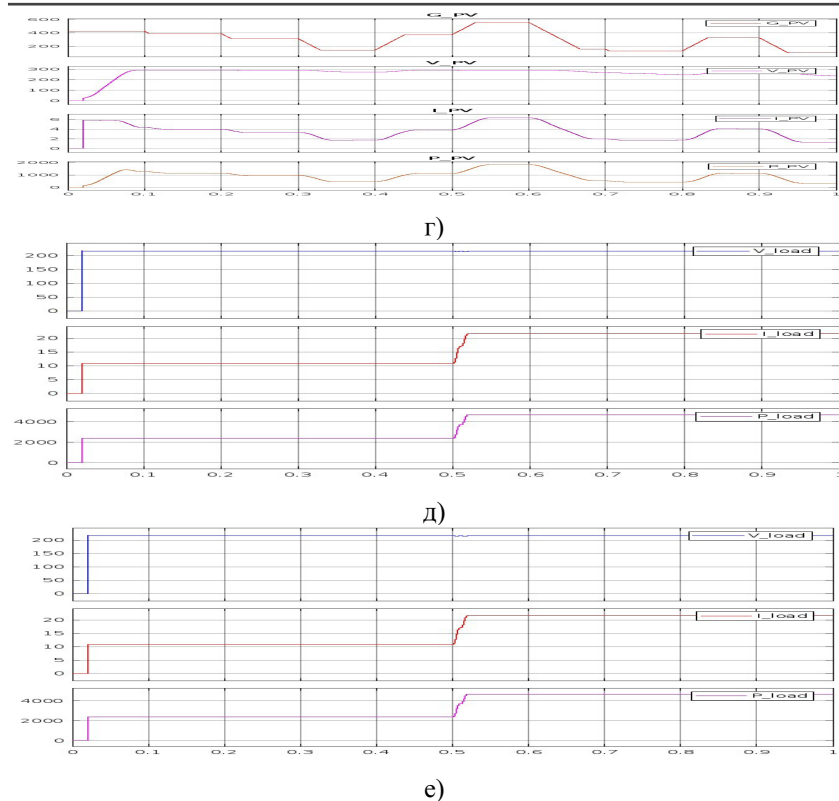


Рисунок 10 – Результаты моделирования PV панели и нагрузки

На рисунке 11 формы сигналов тока и напряжения на выходе инвертора сохраняют синусоидальный характер даже при колебаниях входной солнечной генерации, что указывает на отсутствие значительных гармонических искажений и эффективную фильтрацию. Таким образом, модель демонстрирует как адекватность описания физико-технических процессов преобразования солнечной энергии, так и устойчивость при воздействии внешних возмущений, включая колебания метеоусловий и резкие изменения электрической нагрузки

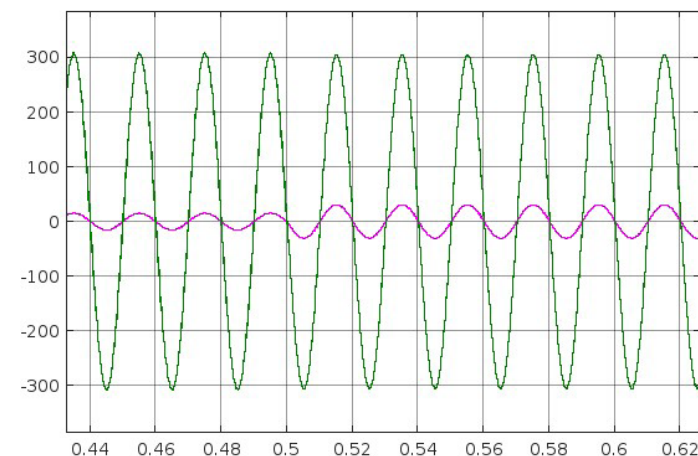


Рисунок 11 – Выход от инвертора

Синусоидальная форма от инвертора реализована благодаря высокой частоте коммутации полупроводниковых ключей и фильтров низких частот.

Информация о Финансировании

Данное исследование финансировалось Министерством науки и высшего образования Республики Казахстан. Грант № BR21882294 «Автономная система энергообеспечения отдаленных регионов Казахстана на базе ВИЭ».

Выводы

Разработана имитационная модель малой солнечной электростанции, обеспечивающая исследование ее рабочих параметров в различных режимах. В ней рассмотрены влияние внешних метеорологических факторов на характеристики PV панели, что увеличивает точность ожидаемых расчетов в генерации электроэнергии для изучаемой территории.

Начальными данными имитационной модели являются номер дня года, широта и долгота местности, часовой пояс, наклон и азимутальный угол панели, а также максимальный уровень солнечной инсоляции в полдень и время.

В течение моделирования имитируются временные графики солнечной инсоляции, энергетические характеристики PV панели и их ВАХ, а также осциллограмма выхода инвертора. С помощью изменением коэффициентов ПИ регулятора можно достичь наименьшее отклонение и высокую скорость реагирования регулируемого параметра (напряжение).

Полученные при имитации режимов малой солнечной электростанции результаты дает возможность обоснованного выбора рационального режима

эксплуатации, требуемой емкости аккумулятора, номинального напряжения и установленной мощности PV панели, а также определения методов эффективного управления системы в целом.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Приказ и.о. Министра энергетики Республики Казахстан от 14.01.2025 г. №14-н/к. Об утверждении прогнозных балансов электрической энергии и мощности в единой электроэнергетической системе Республики Казахстан на период с 2025 по 2031 годы. [Электронный ресурс]. – https://online.zakon.kz/Document/?doc_id=33900908
- 2 Указ Президента Республики Казахстан от 2 февраля 2023 года № 121. Об утверждении Стратегии достижения углеродной нейтральности Республики Казахстан до 2060 года. [Электронный ресурс]. – https://online.zakon.kz/Document/?doc_id=32669610
- 3 Программа развития ООН. Путь Казахстана к чистой энергии и климатической устойчивости. 20.12.2024 г. [Электронный ресурс]. - <https://www.undp.org/ru/kazakhstan/stories/put-kazakhstana-k-chistoy-energii-i-klimaticheskoy-ustoychivosti>
- 4 Расчетно-финансовый центр по поддержке возобновляемых источников энергии Министерства энергетики Республики Казахстан. [Электронный ресурс]. – <https://rfc.kz/ru/press-center/news/163797/>
- 5 **T. Orosz, A. Rassolkin, P. Arsenio, P. Poor, D. Valme, A. Sleisz.** Current Challenges in Operation, Performance, and Maintenance of Photovoltaic Panels. [Текст] Energies. Basel. 2024, Vol.17 (6), P.1306.
- 6 **Нурсеитов Б. А.** Имитационная модель солнечной радиации в среде Matlab Simulink. [Текст] Вестник Торайғыров университета Энергетическая серия. № 1 (2022). <https://doi.org/10.48081/WRIX7218>
- 7 Matlab Help Center. Documentation. PV Array. [Электронный ресурс]. – <https://www.mathworks.com/help/sps/powersys/ref/pvarray.html>
- 8 Risen Energy. RSM144-9-550M. High Performance Monocrystalline Perc module. Data Sheet. [Электронный ресурс]. – <https://www.hdt.energy/wp-content/uploads/2022/12/Monofacial-RSM144-9-535-555M-IEC1500V-35mm-2022H1-1-EN.pdf>
- 9 **Лачин В. И., Савелов Н. С.** Электроника. [Текст] Ростов-на-Дону: Феникс, 2009. – 703 с.
- 10 **Семенов Б. Ю.** Силовая электроника от простого к сложному. [Текст] Москва. Солон-Пресс, 2005. – 416 с.

11 Challenger. Свинцово-кислотный аккумулятор AGM 12B, A12-150. Data Sheet. [Электронный ресурс]. – <https://krasnodar.ups-mag.ru/catalog/battery/challenger/challenger-a12-150>

REFERENCES

- 1 Prikaz i.o. Ministra energetiki Respubliki Kazahstan ot 14.01.2025 g. №14-n/k. Ob utverzhdenii prognoznyh balansov elektricheskoy energii i moshchnosti v edinoj elektroenergeticheskoy sisteme Respubliki Kazahstan na period s 2025 po 2031 gody. [Order of the Acting Minister of Energy of the Republic of Kazakhstan dated January 14, 2025 No. 14-n/k. On approval of the forecast balances of electric energy and capacity in the unified Electric power system of the Republic of Kazakhstan for the period from 2025 to 2031][Elektronnyj resurs]. – https://online.zakon.kz/Document/?doc_id=33900908
- 2 Ukaz Prezidenta Respubliki Kazahstan ot 2 fevralya 2023 goda № 121. Ob utverzhdenii Strategii dostizheniya uglerodnoj nejtral'nosti Respubliki Kazahstan do 2060 goda. [Decree of the President of the Republic of Kazakhstan dated February 2, 2023 No. 121. On approval of the Strategy for Achieving Carbon Neutrality of the Republic of Kazakhstan until 2060] [Elektronnyj resurs]. – https://online.zakon.kz/Document/?doc_id=32669610
- 3 Programma razvitiya OON. Put Kazakhstana k chistoy energii i klimaticheskoy ustoychivosti. 20.12.2024 g. [The United Nations Development Program. Kazakhstan's path to clean energy and climate sustainability] [Elektronnyj resurs]. - <https://www.undp.org/ru/kazakhstan/stories/put-kazakhstana-k-chistoy-energii-i-klimaticheskoy-ustoychivosti>
- 4 Raschetno-finansovyy centr po podderzhke vozobnovlyаемых istochnikov energii Ministerstva energetiki Respubliki Kazahstan. [Settlement and Financial Center for Support of Renewable Energy Sources of the Ministry of Energy of the Republic of Kazakhstan] [Elektronnyj resurs]. – <https://rfc.kz/ru/press-center/news/163797/>
- 5 **T. Orosz, A. Rassolkin, P. Arsenio, P. Poor, D. Valme, A. Sleisz.** Current Challenges in Operation, Performance, and Maintenance of Photovoltaic Panels. [Text] Energies. Basel. 2024, Vol.17 (6), P.1306.
- 6 **Nurseitov B. A.** Imitacionnaya model solnechnoj radiacii v srede Matlab Simulink. [Simulation model of solar radiation in Matlab Simulink environment] [Text] Vestnik Torajgyrov universiteta Energeticheskaya seriya. № 1 (2022). <https://doi.org/10.48081/WRIX7218>
- 7 Matlab Help Center. Documentation. PV Array. [Elektronnyj resurs]. – <https://www.mathworks.com/help/sps/powersys/ref/pvarray.html>

8 Risen Energy. RSM144-9-550M. High Performance Monocrystalline Perc module. Data Sheet. [Elektronnyj resurs]. - <https://www.hdt.energy/wp-content/uploads/2022/12/Monofacial-RSM144-9-535-555M-IEC1500V-35mm-2022H1-1-EN.pdf>

9 Lachin V. I., Savelov, N.S. Elektronika. [Electronics] [Text] Rostov-na-Donu: Feniks, 2009. – 703 p

10 Semenov B.YU. Silovaya elektronika ot prostogo k slozhnomu. [Power electronics from simple to complex] [Text] Moskva. Solon-Press, 2005. – 416 p.

11 Challenger. Svincovo-kislotnyj akkumulyator AGM 12V, A12-150. Data Sheet. [AGM 12V lead-acid battery, A12-150] [Elektronnyj resurs]. – <https://krasnodar.ups-mag.ru/catalog/battery/challenger/challenger-a12-150>

Поступило в редакцию 14.03.25

Поступило с исправлениями 15.07.25

Принято в печать 05.09.25

*Б. А. Нурсеитов¹, Е. Хидолда², А. О. Бердибеков³, Н. О. Марат⁴

^{1,2,3,4}Satbayev University, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.

14.03.25 ж. баспаға түсті.

15.07.25 ж. түзетулерімен түсті.

05.09.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

АВТОНОМДЫ ШАҒЫН КҮН ЭЛЕКТР СТАНЦИЯСЫ ЖҮЙЕСІН МОДЕЛЬДЕУ

Қазақстанда энергия тұтынудың артуын және экологиялық мәселелерге қызығушылықтың артуын ескере отырып, жаңартылатын энергия көздері, әсіресе күн энергетикасы энергетика секторының тұрақты дамуының негізгі элементіне айналууда. Автономды шағын күн электр станциялары (СЭС) орталықтандырылған желілерге қосылу мүмкін емес немесе мүмкін емес шалғай аумақтарды электр энергиясымен қамтамасыз ету үшін перспективалы шешім болып табылады. Алайда, оларды пайдалану энергия өндірудің өзгергіштігі, ауа-райына тәуелділік және энергия сақтау құралдарын тиімді басқару қажеттілігі сияқты бірқатар мәселелермен байланысты. Бұл зерттеу Matlab/Simulink бағдарламалық жасақтамасын қолдана отырып, шағын автономды СЭС модельдеу моделін әзірлеу мен талдауды ұсынады. Модель күн радиациясының қарқындылығы, ауа температурасы және бұлттылық сияқты сыртқы метеорологиялық факторлардың фотоэлектрлік панельдердің жұмысына әсерін

ескереді. Оған күн радиациясын модельдеу блоктары, фотоэлектрлік элемент, энергияны сақтау жүйесі, тұрақты ток түрлендіргіші (boost түрлендіргіші) және автономды инвертор кіреді. Модельдеу нәтижелері айнымалы күн инсоляциясы мен жүктеме жағдайында дамыған жүйенің жұмысының жеткіліктілігін көрсетті. Жүргізілген талдау жүйе параметрлерін, соның ішінде күн панельдерінің қуатын, батарея сыйымдылығын және түрлендіргіш реттегіштерінің параметрлерін оңтайландыруға мүмкіндік береді. Имитациялық модельдеуді қолдану СЭС жұмыс режимдерін болжауға және оны пайдаланудың ұтымды стратегияларын таңдауға мүмкіндік береді, бұл автономды энергетикалық жүйелердің сенімділігі мен тиімділігін арттырады.

Кілтті сөздер: күн панельдері, инверторлар, батареялар, модельдеу, күшейтетін түрлендіргіш, ПИ реттегіші.

*B. A. Nurseitov¹, Y. Khidolda², A. O. Berdibekov³, N. O. Marat⁴

^{1,2,3,4}Satbayev University, Republic of Kazakhstan, Almaty

Received 14.03.25

Received in revised form 15.07.25

Accepted for publication 05.09.25

SIMULATION OF AN AUTONOMOUS SMALL SOLAR POWER PLANT SYSTEM

Given the increasing energy consumption in Kazakhstan and the increasing interest in environmental issues, renewable energy sources, especially solar energy, are becoming a key element of the sustainable development of the energy sector. Autonomous small solar power plants (SPP) are a promising solution for providing electricity to remote areas where connection to centralized networks is impossible or impractical. However, their operation is fraught with a number of problems, such as the variability of energy generation, dependence on weather conditions and the need for effective management of energy storage. This study presents the development and analysis of a simulation model of a small autonomous SPP using Matlab/Simulink software. The model takes into account the influence of external meteorological factors, such as the intensity of solar radiation, air temperature and clouds, on the operation of photovoltaic panels. It includes blocks for modeling solar radiation, a photovoltaic module, an energy storage system, a DC converter (boost converter) and

an autonomous inverter. The simulation results showed the adequacy of the developed system in conditions of variable solar insolation and load. The analysis makes it possible to optimize the system parameters, including the power of the solar panels, the capacity of the batteries and the settings of the converter regulators. The use of simulation modeling makes it possible to predict SPP operating modes and choose rational strategies for its operation, which increases the reliability and efficiency of autonomous energy systems.

Keywords: solar panels, inverters, batteries, modeling, boost converter, PI regulator.

SRSTI 67.09.00

<https://doi.org/10.48081/NILE8865>

***Zh. M. Omarov¹, G. A. Zhukenova², K. T. Sakanov³,
S. T. Mussakhanova⁴, A. N. Zhakanov⁵**

^{1,2,3,4}Toraighyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar

⁵L. N. Gumilyov Eurasian National University,
Republic of Kazakhstan, Astana

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1108-9509>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4096-5002>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2897-2947>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2249-7292>

⁵ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8747-3788>

*e-mail: zhumabek-omarov@mail.ru

DEVELOPMENT OF ASH-SOIL COMPOSITE MATERIAL BASED ON WASTE FROM THERMAL POWER ENGINEERING

The article discusses the possibility of using ash from coal combustion at GRES-2 in the Pavlodar region to obtain ash-soil composite materials designed to strengthen the foundations of highways. The purpose of the study is to develop the composition of ash soil material with high physical, mechanical and operational characteristics. Within the framework of the study, the tasks were set to study the regularities of the formation of the structure of the material, as well as to develop the technology of its manufacture. The theoretical and practical significance of the work lies in the possibility of reusing industrial waste, reducing the environmental burden and the cost of building road infrastructure.

A review of domestic and foreign literature on the use of fly ash in the construction industry was also carried out. Particular attention in the literature review was paid to studies carried out in Kazakhstan, where there are significant volumes of ash waste from thermal power plants and state district power plants, especially in regions with a developed energy industry, such as Pavlodar, Karaganda and East Kazakhstan regions. The results of the analysis show the relevance of processing ash into building materials in order to improve the environmental and economic efficiency of road construction.

Keywords: fly ash, waste disposal, composite materials, industrial wastes, coal.

Introduction

The relevance of the topic is due to the need to solve environmental and economic problems associated with the utilization of ash generated in the process of coal combustion at thermal power plants. [1; 2]. In the Republic of Kazakhstan, as in many countries with developed energy sector, significant volumes of ash are generated annually, which are stored in ash dumps, occupying valuable land plots and harming the environment. [3]. At the same time, ash has a number of potentially useful properties that can be effectively used in the construction industry, especially in the production of road construction materials. [4;5].

The purpose of this work is to develop an ash-soil composite material with high physical and mechanical properties, suitable for strengthening the foundations of highways. The object of the study is the ash-soil materials of the Pavlodar region, and the subject is the development of an effective composition and technology for its manufacture.

The following tasks are considered in the work:

- to identify the patterns of formation of the structure and properties of ash-soil composites [6];
- to determine the influence of formulation and technological factors [7];
- to develop a technology for strengthening road bases using ash [8].

The scientific novelty lies in the theoretical substantiation and experimental confirmation of the processes of hardening and structure formation of ash soils by varying the composition, humidity and compaction pressure [9; 10]. The practical significance of the work lies in the creation of an environmentally friendly and cost-effective building material that contributes to the processing of industrial waste and improves the quality of road construction [11; 12].

Literature review

In recent years, there has been a steady increase in interest in the reuse of ash and ash and slag waste from thermal power engineering to create composite building materials. This is due to the environmental problems of waste disposal and the need to develop sustainable solutions in construction.

Thus, El Kanzaoui M. et al. [13] studied the physical and mechanical behavior of a new composite material based on ash from coal combustion at ultra-supercritical thermal power plants. The authors showed that properly modified ash can be used as an effective filler in composite matrices, demonstrating good thermal insulation and strength characteristics.

Saha M. [14] presented a systematic review of the literature on ash-based composites, focusing on the relationship between the structure, production

technology and properties of finished materials. The work highlights the potential to create a standardized classification of ash for engineering applications.

A study by Hosseinpour Sheikhrjab A. and Osmanlioglu A.E. [15] analyzed the effect of ash obtained at the Tunchbilek TPP on the properties of cement composites. The results showed that when replacing up to 30% of cement with ash, strength characteristics improve, especially in the late hardening periods, due to pozzolanic reactions.

Kolokhov V. et al. [16] investigated the possibilities of secondary use of ash and slag from coal-fired thermal power plants in Ukraine in construction. They determined the optimal parameters for waste preparation and treatment, which improve adhesion to the cement matrix and increase resistance to external influences.

Islam M.R. et al. [17] proposed an innovative approach to soil stabilization using medical and coal ash in combination with plastic fibers. Their composites have shown increased bearing capacity and erosion resistance, which confirms the prospects of such solutions for road construction.

Methods and materials

To conduct the study, fly ash from coal combustion was used at the Ekibastuz GRES-2, located in the Pavlodar region. The ash was selected from the ash dump and pre-dried at room temperature. Local sandy and sandy loam soils that meet the requirements for use in road construction were used as a soil base.

Mixtures of ash and soil components were selected in different ratios (from 10 % to 50 % ash from the weight of the dry mixture) to determine the optimal composition. To improve the strength characteristics, binders were introduced into the composition: Portland cement and lime in small quantities (up to 10 %).

- Determination of the granulometric composition of ash and soil;
- Compression strength tests according to the GOST method after 7, 14 and 28 days of hardening;
- Determination of the density and moisture content of samples;
- Water and frost resistance tests to check the resistance of the material to weather conditions;

Study of the microstructure of the solidified material using a microscope (optical and/or electronic).

Samples were prepared by static compaction into cylindrical shapes, then kept under standard conditions (humidity 90–95 %, temperature +20–22°C). After that, laboratory tests were carried out to assess the physical and mechanical characteristics.

The use of such methods made it possible to assess how the properties of the material change with different proportions of ash and to select the composition that has the best strength and durability.

Results and discussion

Study of ash-soil compositions strengthened with binders. In the context of high costs for traditional road construction materials (cement, bitumen, crushed stone), the development of new building compositions using local resources and industrial waste is of particular relevance. Within the framework of this experimental work, the possibility of improving the physical and mechanical properties of soils with the use of fly ash and ash and slag mixtures (ASS) formed during the combustion of coals from the Ekibastuz deposit at the Ekibastuz GRES-2 was investigated.

The experiments were carried out on loam and sands from the Aksus deposit, which has a significant amount of raw materials for construction needs. The following binders were chosen:

- PC400-D20 Portland cement, which has high strength and a quick set of strength characteristics;
- Hydraulic quicklime with an active calcium oxide content of 65–70 %;
- Hardening activator – calcium chloride (CaCl_2), used to accelerate the hardening of compositions and increase their durability.

Improving the properties of loam using fly ash

At the first stage, the waterlogged loam was drained by introducing fly ash in an amount of 5 % to 30 % by weight. The results showed that an increase in the dosage of ash leads to a noticeable decrease in the moisture content of the material, which creates the prerequisites for its subsequent strengthening.

Strengthening loam with binders

In the second part of the experiment, the improved ash mixtures were strengthened with binders. It was found that the use of cement in the conditions of the northern regions of Kazakhstan requires increased dosages due to the deep seasonal freezing of soils. Therefore, the main emphasis was placed on the use of lime as a more economical and climate-adapted material.

To increase the hardening efficiency, 1 % of calcium chloride dissolved in the mixing water was additionally added to the lime ash mixture (with 25% fly ash). The mixtures were subjected to compaction and hardening under conditions close to reality. The following characteristics were determined:

- Uniaxial compressive strength,
- Water resistance coefficient after water saturation,
- Frost resistance after freeze/thaw cycles,
- Optimal humidity and maximum density.

The composition (loam + ash) shows the lowest strength - 0.35 MPa, which is not enough for use in construction purposes.

The addition of lime significantly increases the strength to 1.04 MPa due to the formation of bonds between particles due to the pozzolanic-type reaction.

The combination of lime and CaCl_2 is even more efficient at 1.25 MPa, thanks to faster hardening and higher structure density.

The cement in the composition gives a strength of 1.38 MPa, confirming its active role in the formation of a strong binder.

The maximum strength of 1.60 MPa is achieved by using cement and CaCl_2 together, which provides both strength and accelerated hardening.

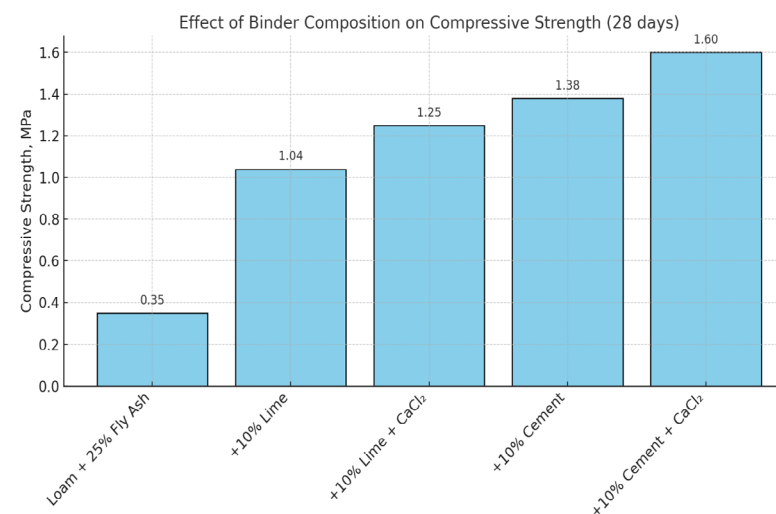


Figure 1 – Effect of the composition of sol-primers on strength after 28 days

The results showed that the addition of fly ash and reinforcement with lime with an activator can significantly improve the strength and frost-resistant characteristics of ash-soil compositions, making them suitable for use in the foundation of road structures of the IV road-climatic zone. Thus, the combination of local soils, ash and slag waste and available binders (Portland cement and lime) is a promising direction for the construction of inexpensive and durable road bases.

Conclusions

1 The use of fly ash as a mineral binder in the composition of ash and soil mixtures makes it possible to effectively dispose of man-made waste and reduce the cost of building materials.

3 The combined use of CaCl_2 with lime or cement gives a pronounced synergistic effect - higher strength is achieved due to accelerated hardening and reduced porosity of the material.

4 The maximum strength (1.60 MPa) is obtained by using cement and CaCl_2 , which indicates the prospects of this composition for load-bearing elements in low-rise construction and foundation construction.

Recommendations

1 To improve the strength characteristics of ash soils, it is recommended to use combined compositions based on ash, cement (6–8 %) and CaCl_2 (1–2%) as an activating additive.

2 The optimal ratio of components should be specified taking into account the characteristics of the local ash and soil, as well as the technological conditions of molding.

3 To accelerate strength gain in conditions of low temperature and humidity, it is advisable to use CaCl_2 as a hardening accelerator.

4 In the production of building blocks and foundation elements, use compositions with cement and CaCl_2 that provide a strength of more than 1.5 MPa.

5 Further research on the durability and water resistance of the developed compositions, including alternating freezing and thawing, is recommended to assess their suitability under different climatic conditions.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Минаев, А. Н., Савинков, С. Ю., Лаптев, А. Н.** Использование золошлаковых смесей в строительстве лесных дорог // Вестник Томского политехнического университета – 2019 – Т. 330, № 2 – С. 45 – 52.

2 **Буланов, П. Е.** Повышение эксплуатационных характеристик суглинистых грунтов при укреплении портландцементом с комплексными гидрофобно – пластифицирующими добавками : дис. ... канд. техн. наук. – СПб., 2018 – 153 с.

3 **Ермаков, А. В., Петров, И. С.** Теоретические основы укрепления золошлаковых грунтов связующими компонентами // Труды Санкт-Петербургского лесотехнического университета – 2020 – № 4 – С. 55 – 61.

4 **Ахметов, Н. А., Абдрахманова, С. К.** Перспективы использования золы ТЭС в дорожном строительстве // Труды КазНИИСА – 2020 – № 1(78). – С. 22 – 26.

5 **Батырханова, А. Б., Даулетова, Л. К.** Экологические аспекты утилизации золы в строительстве // Вестник КазНТУ – 2021 – № 3 – С. 35 – 39.

6 **Асанов, Т. М., Жумагалиева, Ж. С.** Исследование структуры и прочности золошлаковых композитов // Вестник транспортно – строительного комплекса – 2022 – № 6 – С. 40 – 46.

7 **Алиев, Б. Т., Кожаметов, С. М.** Влияние состава и давления уплотнения на прочностные характеристики грунтов // Известия вузов. Строительство – 2021 – № 9 – С. 27 – 31.

8 **Сергеев, П. К., Досжанова, Г. Б., Наурызбаев, Р. Т.** Способ получения строительного материала на основе золы : пат. № KZ12345 – Оpubл. 2021 – Бюл. № 12.

9 **Иванов, И. И., Ахметова, А. А., Ким, С. В.** Состав для изготовления золошлаковой строительной смеси : пат. № KZ67890. – Оpubл. 2020. – Бюл. № 6.

10 **Тусупов, К. А., Абдраимова, С. Т.** Технология отверждения золошлаковых смесей при различных режимах уплотнения // Вестник КазНИИСА. – 2021 – № 2(79) – С. 15 – 20.

11 **Тлеубаева, А. К.** Экономическая эффективность использования золы ТЭС в строительстве // Вестник Национальной академии наук Республики Казахстан – 2022 – № 4 – С. 29 – 33.

12 **Каримова, А. Т.** Утилизация промышленных отходов в дорожном строительстве // Строительные материалы – 2019 – № 10 – С. 58 – 61.

13 **El Kanzaoui, M., El Mahi, A., Nait Ali, H.** Characterization and properties of composite materials based on coal fly ash from ultra-supercritical thermal power plants // Journal of Composites Science (Journal of Composite Materials) – 2021 – Vol. 5, № 6 – P. 151 – DOI : 10.3390/jcs5060151.

14 **Saha, M. A.,** review on fly ash-based composites: Fabrication methods and structure–property relationships // arXiv (Pre-press archive arXiv) – 2022 – arXiv:2202.11167 – URL : <https://arxiv.org/abs/2202.11167> (Accessed: 23.04.2025).

15 **Hosseinpour Sheikhrjab, A., Osmanlioglu, A.E.** Effect of thermal power plant fly ash on Portland cement properties: Case study of Tunçbilek TPP // International Journal of Natural and Applied Sciences (International Journal of Natural and Applied Sciences) – 2024 – Vol. 10, No. 1 – URL : <https://dergipark.org.tr/en/pub/idunas/issue/88435/1436316> (Accessed on: 23.04.2025).

16 **Kolokhov, V., Moroz, L., Romin, A., Kovregin, V.** Use of ash and slag waste from coal-fired power plants in the construction industry // Materials Science Forum (Materials Science Forum) – 2021 – Vol. 1038 – P. 290–296 – DOI : 10.4028/www.scientific.net/MSF.1038.290.

17 **Islam, M.R., Hossain, M., Iqbal, M.** Sustainable soil stabilization using medical waste incineration ash, coal ash, and PET strips // Journal of Materials in Civil Engineering (Journal of Materials in Civil Engineering) – 2025 – DOI : 10.1061/JMCEE7.MTENG-18665.

REFERENCES

1 **Minaev, A. N., Savinkov, S. Yu., Laptev, A. N.** Ispol'zovanie zoloshlakovykh smesei v stroitel'stve lesnykh dorog [The use of ash polymer mixtures in the construction of forest roads] // Vestnik Tomskogo Politehnicheskogo Universiteta – Bulletin of Tomsk Polytechnic University – 2019 – Vol. 330, № 2 – P. 45–52.

2 **Bulanov, P. E.** Povyshenie ekspluatatsionnykh kharakteristik suglinistykh gruntov pri ukreplenii portlandtsementom s kompleksnymi gidrofobno-plastifitsiruyushchimi dobavkami: dis. ... kand. tekhn. nauk [Improving the Operational Characteristics of Clayey Soils Strengthened by Portland Cement with Complex Hydrophobic-Plasticizing Additives: Cand. Tech. Sci. Thesis] – SPb., 2018 – 153 p.

3 **Ermakov, A. V., Petrov, I. S.** Teoreticheskie osnovy ukrepleniya zoloshlakovykh gruntov svyazuyushchimi komponentami [Theoretical foundations for strengthening ash-soil mixtures with binders] // Trudy Sankt-Peterburgskogo Lesotekhnicheskogo Universiteta – Proceedings of St. Petersburg Forestry Technical University – 2020 – № 4. – P. 55–61.

4 **Akhmetov, N. A., Abdrakhmanova, S. K.** Perspektivy ispol'zovaniya zoly TES v dorozhnom stroitel'stve [Prospects for the use of fly ash from thermal power plants in road construction] // Works of KazNIISA. – 2020. – №. 1(78). – P. 22–26.

5 **Batyrbekhanova A.B., Dauletova L.K.** Ekologicheskie aspekty utilizatsii zoly v stroitel'stve [Ecological aspects of ash utilization in construction] // Vestnik KazNTU – Bulletin of KazNTU – 2021. – № 3 – P. 35–39.

6 **Asanov, T. M., Zhmagaliyeva, Zh. S.** Issledovanie struktury i prochnosti zoloshlakovykh kompozitov [Study of the structure and strength of ash-soil composites] // Vestnik Transportno-Stroitel'nogo Kompleksa – Bulletin of the Transport and Construction Complex – 2022 – № 6 – P. 40 – 46.

7 **Aliev, B. T., Kozhakhmetov, S. M.** Vliyanie sostava i davleniya uplotneniya na prochnostnye kharakteristiki gruntov [Influence of composition and compaction pressure on the strength characteristics of soils] // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Stroitel'stvo – Proceedings of Higher Educational Institutions. Construction – 2021 – № 9 – P. 27–31.

8 **Sergeev, P. K., Doszhanova, G. B., Nauryzbaev, R. T.** Sposob polucheniya stroitel'nogo materiala na osnove zoly: pat. No. KZ12345 [Method for producing ash-based building material: Patent №. KZ12345] – Publ. 2021 – Bul. №. 12.

9 **Ivanov, I. I., Akhmetova, A. A., Kim, S. V.** Sostav dlya izgotovleniya zoloshlakovoy stroitel'noy smesi : pat. №. KZ67890 [Composition for manufacturing ash-soil construction mixture : Patent №. KZ67890] – Publ. 2020 – Bul. № 6.

10 **Tusupov, K. A., Abdraimova, S. T.** Tekhnologiya otverzhdeniya zoloshlakovykh smesei pri razlichnykh rezhimakh uplotneniya [Technology of ash-soil mixture hardening under various compaction regimes] // Bulletin of the

Kazakh Research and Design Institute of Construction and Architecture – 2021 – № 2(79) – P. 15–20.

11 **Tleubaeva, A. K.** Ekonomicheskaya effektivnost' ispol'zovaniya zoly TES v stroitel'stve [Economic efficiency of using fly ash from TPPs in construction] // Vestnik Natsional'noy Akademii Nauk Respubliki Kazakhstan – Bulletin of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan – 2022 – № 4 – P. 29 – 33.

12 **Karimova, A. T.** Utilizatsiya promyshlennykh otkhodov v dorozhnom stroitel'stve [Utilization of industrial waste in road construction] // building material – Construction Materials – 2019 – №. 10 – P. 58 – 61.

13 **El Kanzaoui, M., El Mahi, A., Nait Ali, H.** Characterization and properties of composite materials based on coal fly ash from ultra-supercritical thermal power plants // Journal of Composites Science (Journal of Composite Materials) – 2021 – Vol. 5, No. 6. – P. 151. – DOI: 10.3390/jcs5060151.

14 **Saha, M. A** review on fly ash-based composites: Fabrication methods and structure–property relationships // arXiv (Pre-press archive arXiv) – 2022 – arXiv:2202.11167 – URL : <https://arxiv.org/abs/2202.11167> (Accessed: 23.04.2025).

15 **Hosseinpour Sheikhrjab, A., Osmanlioglu, A.E.** Effect of thermal power plant fly ash on Portland cement properties: Case study of Tunçbilek TPP // International Journal of Natural and Applied Sciences (International Journal of Natural and Applied Sciences) – 2024 – Vol. 10, № 1. – URL: <https://dergipark.org.tr/en/pub/idunas/issue/88435/1436316> (Accessed on: 23.04.2025).

16 **Kolokhov, V., Moroz, L., Romin, A., Kovregin, V.** Use of ash and slag waste from coal-fired power plants in the construction industry // Materials Science Forum (Materials Science Forum) – 2021 – Vol. 1038 – P. 290–296 – DOI : 10.4028/www.scientific.net/MSF.1038.290.

17 **Islam, M.R., Hossain, M., Iqbal, M.** Sustainable soil stabilization using medical waste incineration ash, coal ash, and PET strips // Journal of Materials in Civil Engineering (Journal of Materials in Civil Engineering) – 2025 – DOI : 10.1061/JMCEE7.MTENG-18665.

Received 14.04.25

Received in revised form 25.04.25

Accepted for publication 05.09.25

*Ж. М. Омаров¹, Г. А. Жукенова², Қ. Т. Сақанов³,

С. Т. Мұсаханова⁴, А. Н. Жаканов⁵

^{1,2,3,4}Торайғыров Университеті, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.

⁵Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия Ұлттық университеті,

Қазақстан Республикасы, Астана қ.

14.04.25 ж. баспаға түсті.

25.04.25 ж. түзетулерімен түсті.

05.09.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

ЖЫЛУ ЭНЕРГЕТИКАСЫ ҚАЛДЫҚТАРЫНАН КҮЛДІ ТОПЫРАҚ ҚҰРАМАЛЫ МАТЕРИАЛДАРЫН ӘЗІРЛЕУ

Мақалада Павлодар облысындағы ГРЭС-2-де көмірді жсаудан алынған күлді автомобиль жолдарының іргетасын нығайтуға арналған күл-топырақ композиттік материалдарын алу үшін пайдалану мүмкіндігі қарастырылған. Зерттеудің мақсаты – жоғары физикалық, механикалық және эксплуатациялық сипаттамалары бар күл мен топырақ материалының құрамын жасау. Зерттеу шеңберінде материалдың құрылымының қалыптасу заңдылықтарын зерттеу, сонымен қатар оны жасау технологиясын әзірлеу міндеттері қойылды. Жұмыстың теориялық және практикалық маңыздылығы өндірістік қалдықтарды қайта өңдеу, экологиялық жүктемені және жол инфрақұрылымын салу шығындарын азайту мүмкіндігінде жатыр.

Сондай-ақ құрылыс индустриясында күлді пайдалану бойынша отандық және шетелдік әдебиеттерге шолу жасалды. Әдебиеттерді шолуда ерекше көңіл жылу электр станциялары мен мемлекеттік аудандық электр станцияларының күл қалдықтарының айтарлықтай көлемі бар Қазақстанда, әсіресе Павлодар, Қарағанды және Шығыс Қазақстан облыстары сияқты энергетикалық саласы дамыған аймақтарда жүргізілген зерттеулерге аударылды. Талдау нәтижелері жол құрылысының экологиялық және экономикалық тиімділігін арттыру мақсатында күлді құрылыс материалдарына өңдеудің өзектілігін көрсетеді.

Кілтті сөздер: күл, қалдықтар, композиттік материалдар, өнеркәсіптік қалдықтар, көмір.

*Ж. М. Омаров¹, Г. А. Жукенова², К. Т. Саканов³,

С. Т. Мусаханова⁴, А. Н. Жаканов⁵

^{1,2,3,4}Торайғыров Университет, Республика Казахстан, г. Павлодар

⁵Евразийский Национальный Университет имени Л. Н. Гумилева,

Республика Казахстан, г. Астана

Поступило в редакцию 14.04.25

Поступило с исправлениями 25.04.25

Принято в печать 05.09.25

РАЗРАБОТКА ЗОЛОГРУНТОВОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОТХОДАХ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКИ

В статье рассматривается возможность использования золы от сжигания угля на ГРЭС-2 Павлодарской области для получения зологрунтовых композиционных материалов, предназначенных для укрепления оснований автомобильных дорог. Цель исследования – разработка состава зологрунтового материала с высокими физико-механическими и эксплуатационными характеристиками. В рамках исследования поставлены задачи по изучению закономерностей формирования структуры материала, а также по разработке технологии его изготовления. Теоретическая и практическая значимость работы заключается в возможности вторичного использования промышленных отходов, снижении экологической нагрузки и затрат на строительство дорожной инфраструктуры.

Также был проведен обзор отечественной и зарубежной литературы по теме использования золы-уноса в строительной отрасли. Особое внимание в литературном обзоре было уделено иссле

дованиям, выполненным в Казахстане, где имеются значительные объемы золоотходов от ТЭЦ и ГРЭС, особенно в регионах с развитой энергетической промышленностью, таких как Павлодарская, Карагандинская и Восточно-Казахстанская области. Результаты анализа показывают актуальность переработки золы в строительные материалы с целью повышения экологической и экономической эффективности дорожного строительства.

Ключевые слова: зола-унос, утилизация отходов, композиционные материалы, промышленные отходы, уголь.

FTAMP 44.29.39

<https://doi.org/10.48081/EUQS2901>

**Б. К. Сакенов¹, И. В. Кошкин^{2*}, А. И. Успанова³,
А. П. Кислов⁴**

^{1,2,3}Ахмет Байтұрсынұлы атындағы Қостанай өңірлік университеті, Қазақстан Республикасы, Қостанай қ.

⁴Торайғыров университеті, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3457-0194>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8637-3665>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3484-8750>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4816-8008>

e-mail: elektroenergetika@mail.ru

ҚОСТАНАЙ ӨҢІРІНДЕ ЖАБЫҚ ТОПЫРАҚ ЖАҒДАЙЫНДА ӨСІМДІКТЕРДІҢ ӨНІМДІЛІГІН РЕТТЕУ ҮШІН ЖЭК ҚОЛДАНУДЫҢ НЕГІЗДЕМЕСІ

Бұл жұмыста Қостанай өңірінің аумағында жабық топырақтағы өсімдіктер өнімділігінің негізгі параметрлерін оңтайландыру үшін жаңартылатын энергия көздерін (ЖЭК) пайдалану қарастырылады. Бұл тақырыптың өзектілігі халықтың өсуі мен жаһандық климаттың өзгеруі жағдайында азық-түлік қауіпсіздігін қамтамасыз ету қажеттілігіне байланысты. Зерттеу күн мен жел энергиясын, сондай-ақ жылыжайларды энергиямен қамтамасыз ету үшін биогаз қондырғыларын біріктіру мүмкіндіктерін талдайды. ЖЭК көмегімен микроклимат параметрлерін (температура, ылғалдылық, жарық) бақылауды автоматтандыруға ерекше назар аударылады, бұл қазба ресурстарына тәуелділікті азайтуға және өнімнің өзіндік құнын төмендетуге мүмкіндік береді. Зерттеулер көрсеткендей, ЖЭК көмегімен жабық жүйелердегі микроклиматты басқару дақылдардың өнімділігі мен өнімділігін едәуір арттыра алады.

Мақалада өсімдіктердің өсу жағдайларын олардың физиологиялық қажеттіліктеріне тиімді бейімдеуге мүмкіндік беретін әртүрлі технологияларды қолдана отырып, температура режимдерін, жарықтандыру мен суаруды реттеудің заманауи тәсілдері сипатталған. Сондай-ақ тұрақты ауыл шаруашылығына қол жеткізу және көміртегі шығарындыларын азайту үшін ЖЭК-ке

қошудің маңыздылығы атап өтіледі. Қорытындылай келе, ЖЭК-ті Қостанай өңірінің климаттық және ресурстық ерекшеліктерін ескеретін өнімділікті бақылау жүйелеріне интеграциялау әдістемесі ұсынылған, бұл агросектордың дамуына және оның технологиялық бәсекеге қабілеттілігін арттыруға ықпал етеді.

Кілтті сөздер: жаңартылатын энергия көздері, энергетика, факторлар, тәжірибе, жылыжайлар, климат, өнімділік.

Кіріспе

Жаңартылатын энергия көздерін (ЖЭК) пайдалана отырып, жабық топырақ жағдайында өсімдіктердің өнгіштігі мен өнімділігіне әсер ететін негізгі параметрлерді реттеудің өзектілігі, ең алдымен, азық-түлік қауіпсіздігі мен Қазақстан халқының өсу факторларымен айқындалады. Жабық жүйелер дақылдарды бақыланатын жағдайларда өсіруге мүмкіндік береді, сыртқы ортаға тәуелділікті азайтады, параметрлерді реттеу өсу қарқыны мен өнімділікке тікелей әсер етеді, бұл азық-түлікпен қамтамасыз ету үшін маңызды [1]. Авторлардың жазбаларындағы заманауи зерттеулер [1; 2] өсу фазасына, дақыл түріне және тәулік уақытына байланысты параметрлерді реттеуге сараланған көзқарас өсімдіктерді өсірудің тиімділігін арттыратынын көрсетеді. Мысалы, өсімдіктердегі стресстің алдын алу үшін күндізгі және түнгі температура режимдерін реттеу керек. Сондай-ақ, авторлар [3] зерттеулеріндегі өсімдіктерді өсірудің тұйық жүйелерін жылытудың жаңа тәсілдерін ұсынады, мысалы, жылыжайдың жарық өткізгіш материалдарын оңтайландыру арқылы жылыуды шоғырландыру және табиғи күн жылыту, жылу мен СО₂ өндіретін органиканы ыдыратуға негізделген биологиялық жылыту, сондай-ақ техникалық гибридтік жүйелерді пайдалану (күн панельдері мен геотермальді сорғылар) микроклиматты басқару жүйелерін электрмен жабдықтау үшін [4; 5; 6] пайдаланылады.

Ғылыми зерттеулер жаңартылатын энергия көздерінің Internet of Things (IoT) технологияларымен үйлесуіне баса назар аударады [7; 8]. Мысалы, күн массивтеріне негізделген жарықтандыруды динамикалық басқару жарық режимін желінің шамадан тыс жүктелуінсіз оңтайландыруға мүмкіндік береді. Ылғалдылық пен СО₂ бақылайтын сенсорлар желдету мен суаруды автоматты түрде реттейді, бұл қуат тұтынуды азайтады. Зерттеулер сонымен қатар гибридті жүйелер ЖЭК құбылмалылығы жағдайында тұрақтылықты қамтамасыз ететінін көрсетеді, бұл жыл бойы өндіріс үшін өте маңызды.

Тұйық жүйелердегі жаңартылатын энергия көздеріне көшу тұрақты даму мақсаттарына сәйкес келеді, дәстүрлі әдістермен салыстырғанда СО₂ шығарындыларын 30% - дан 50% - ға дейін төмендетеді. Ғалымдардың еңбектерінде [9; 10] биогаз қондырғылары энергия өндіріп қана қоймай,

сонымен қатар органикалық қалдықтарды кәдеге жарататыны көрсетілген, бұл айналмалы экономика принциптерін қолдайды. Дегенмен, ЖЭК енгізу технологиялардың өмірлік циклін ескеруді талап етеді: күн панельдері мен жел генераторларын өндіру экологиялық тәуекелдерді арттыруы мүмкін сирек жер металдарын пайдалануды қамтиды.

Барлық зерттеулер көрсеткендей, жаңартылатын энергия көздерін пайдалана отырып, тұйық жер параметрлерін реттеу Қостанай облысында тұрақты және жоғары өнімді ауыл шаруашылығына көшудің негізгі элементі болып табылады. Бұл тәсіл азық-түлік қауіпсіздігі мен климаттық тәуекелдерді шешіп қана қоймайды, сонымен қатар экологиялық жауапкершілікті экономикалық пайдамен үйлестіре отырып, агросектордағы аймақтың технологиялық көшбасшылығына негіз болады.

Зерттеудің мақсаты аймақтың климаттық және ресурстық ерекшеліктеріне бейімделген жабық топырақ жағдайында өсімдіктердің өнімділігін бақылау жүйелеріне ЖЭК интеграциялау әдістемесін әзірлеу болып табылады.

Материалдар мен әдістері

Қостанай өңірінің климаттық және ресурстық ерекшеліктеріне бейімделе отырып, ЖЭК өсімдіктердің өнімділігін бақылау жүйелеріне интеграциялау үшін әдістеме әзірленді.

Зерттеу қызметінің негізгі принциптері мен тәсілдері келесідей тұжырымдалған:

1-процедура - Қостанай өңірінің климаттық жағдайлары мен ресурстық жағдайын талдау;

2-процедура - жабық жердегі өнімділіктің негізгі параметрлерін зерттеу және модельдеу;

3-процедура - қол жетімді ЖЭК-ке шолу және оларды аймақтың климаттық жағдайларына бейімдеу.

ЖЭК-тің өнімділікке әсерін бағалау үшін есептеу және эксперименттік әдістер қолданылды.

Нәтижелер және талқылау

1 процедураның методологиясын іске асыру үшін Қостанай облысы зерттелді, ол метеорологиялық параметрлердің айқын маусымдық өзгергіштігі бар күрт континентальды климатпен сипатталады, бұл жабық жерде өсімдік шаруашылығына ерекше жағдай жасайды. Ауаның орташа жылдық температурасы +3,5°C құрайды, қыс мезгілі арасында айтарлықтай дисперсия бар (-16...-18°C қаңтарда) және жазғы (+20...+22°C шілдеде) көрсеткіштермен. Жылыжай шаруашылығы үшін топырақтың минималды температурасы ерекше маңызды, олар қыста -12°C-ден ...-15°C-ге 20 см тереңдікте жетуі мүмкін, бұл міндетті жер асты жылытуды қажет етеді [11].

Жылдық жауын-шашын мөлшері 300-ден 350 мм-ге дейін өзгереді, жыл мезгілдері бойынша біркелкі таралмайды: шамамен 70% жылы мезгілде (сәуір-қазан) түседі. Салыстырмалы ылғалдылық маусымдық динамиканы көрсетеді-қыс айларында 75–80 %-дан, жазда 50–55% - ға дейін, бұл қарқынды булануға байланысты (жылына 550–600 мм) айқындалады. Мұндай жағдайлар жылыжайлардағы ылғалдылық режимін мұқият бақылауды қажет етеді, әсіресе тұқымның өну кезеңінде [11].

Күн радиациясы жылына 110–115 ккал/см² құрайды, күн сәулесінің ұзақтығы 2100–2200 сағат. Алайда, қыс айларында (желтоқсан-ақпан) бұл көрсеткіш айына 60–80 сағатқа дейін төмендейді, бұл қосымша жарықтандыру жүйелерін қолдануды қажет етеді. Жел режимі оңтүстік-батыс желдерінің орташа жылдамдығы 4–5 м/с, өтпелі кезеңдерде жеке екпіні 15–20 м/с дейін басым болуымен сипатталады, бұл жылыжай қоршау құрылымдары арқылы жылу шығынын арттырады [11].

Қостанай облысында суық қыста 1,8–2,0 м жететін топырақтың қату тереңдігі ерекше назар аударуға тұрарлық. Сонымен қатар, жабық жерде тұқымның өнуі үшін температураның тәуліктік ауытқуы (10–12°C дейін), қыста ауаның төмен абсолютті ылғалдылығы және қарашадан ақпанға дейін фотосинтетикалық белсенді сәулеленудің жетіспеушілігі ең маңызды болып табылады [11].

2-процедура жабық топырақтағы өнімділіктің негізгі параметрлері бойынша зерттеулерді қамтиды, Қостанай өңірінің барлық есептік-климаттық жағдайларын ескере отырып жүргізілді. Аймақтық климаттық ерекшеліктерді есепке алу маусымға қарамастан 85-90% деңгейінде тұқымның өнуін қамтамасыз ететін жабық жерде өсімдіктерді өсірудің тиімді режимдерін жасауға мүмкіндік береді. Зерттеу нәтижелері 1-кестеде келтірілген.

1-кесте – Қостанай өңірінің есептік-климаттық жағдайларының жабық топырақ жағдайында өсімдіктердің өнгіштігіне әсер етуінің факторлық-параметрлік сипаттамалары

Факторлар тобы	Нақты параметр	Оңтайлы диапазон	Критикалық деңгей	Өнгіштікке әсері
Температуралық	Топырақ температурасы	+18...+25°C	<+10°C немесе >+35°C	Биохимиялық процестердің жылдамдығын анықтайды
	Температураның тәуліктік ауытқуы	<5°C	>10°C	Ұрықтың стрессін тудырады
Ылғалдылық	Субстраттың ылғалдылығы	60–80% ең төменгі ылғал сыйымдылығы	<40% немесе >90%	Тұқымның ісінуін қамтамасыз етеді
	Салыстырмалы ылғалдылық	65–75%	<50% немесе >85%	Булануға әсер етеді
Жарық	Жарық қарқындылығы	10–15 мың. люкс	<5 мың. люкс	Фоторецепторларды белсендіреді
	Фотопериод	14–16 сағат	<10 сағат	Зат алмасуды реттейді
Газдық құрамы	CO ₂ концентрациясы	800–1000 ppm	<400 ppm	Өсімдіктің «тыныс алуын» ынталандырады
	O ₂ мазмұны	18–21%	<15%	Аэробты тыныс алуды қамтамасыз етеді
Топырақтық	Субстраттың pH	6,0–7,0	<5,0 немесе >8,0	Элементтердің қол жетімділігіне әсер етеді
	Электр өткізгіштік	0,8–1,2 мСм/см	>2,0 мСм/см	Осмотық қысымды анықтайды
Механикалық	Тұқым себу тереңдігі	1–3 см (тұқым мәдениетіне байланысты)	>5 см	Жарыққа / ауаға қол жеткізуді шектейді
	Субстраттың тығыздығы	0,8–1,1 г/см ³	>1,3 г/см ³	Аэрацияға әсер етеді

1-кестеден көріп отырғанымыздай, Қостанай өңірі үшін ерекшеліктерге мыналар жатады:

– басым мәндері бар температураны, (қысқы жылыту) және ылғалдылықты (азғыруға қарсы күрес) бақылау;

– сілтілі топырақтың рН (аймақтағы типтік көрсеткіш 7,5–8,2), мерзімді негізде түзетуді қажет етеді;

– тұрақты негізде, әсіресе қарашадан ақпанға дейінгі кезеңде пайдалануға талап етілетін жасанды жарықтандыру;

– булануды азайту үшін желден қорғау.

Климаттың негізгі факторларының өсімдіктердің өнімділігі мен өнгіштігіне әсерін растау үшін регрессиялық талдау әдісі [12; 13] нәтижелі белгі мен тәуелсіз айнымалы факторлар арасындағы байланысты бағалау үшін қолданылды.

Өнгіштік көрсеткішін (G) климаттық параметрлермен байланыстыратын жалпы теңдеу құрылды:

$$G = \beta_0 + \beta_1 \cdot T + \beta_2 \cdot H + \beta_3 \cdot L + \beta_4 \cdot C + \beta_{12} \cdot T \cdot H + \beta_{13} \cdot T \cdot L + \beta_{14} \cdot T \cdot C + \beta_{23} \cdot H \cdot L + \beta_{24} \cdot H \cdot C + \beta_{34} \cdot L \cdot C + \varepsilon \quad (1)$$

мұндағы: T – топырақ температурасы, °C;

H – субстраттың ылғалдылығы, %;

L – жарықтандыру, Лк;

C – CO₂ концентрациясы, ppm;

β – регрессия коэффициенті

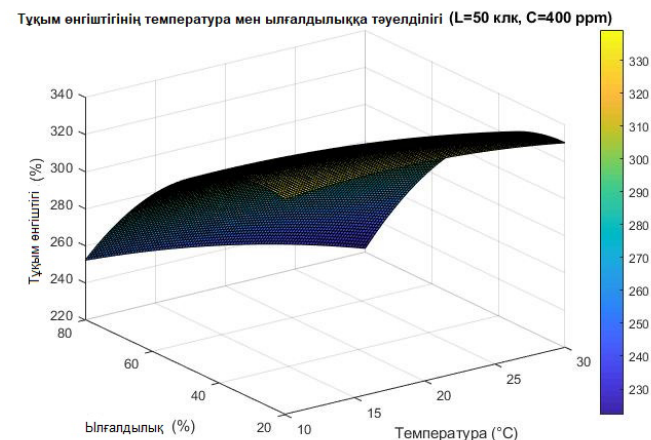
ε – кездейсоқ қате

Қостанай облысының есептік-климаттық жағдайларын ескере отырып, тәуелді кездейсоқ өнгіштік айнымалысы (G) моделі мынадай болады:

$$G = 15,2 + 2,1 \cdot T + 1,8 \cdot H + 0,9 \cdot L + 0,6 \cdot C - 0,05 \cdot T^2 - 0,03 \cdot H^2 - 0,02 \cdot T \cdot H \quad (2)$$

Өсімдіктердің өнгіштігінің әртүрлі факторларға тәуелділігін визуализациялау үшін кейбір регрессия теңдеуінің айнымалыларын бекітетін жауап беттері (MATLAB қосымшасы арқылы) салынған.

1-суретте өнгіштіктің температураға (T) және ылғалдылыққа (H) тұрақты жарықта (L) және CO₂ (C) тәуелділігін зерттеу нәтижелері келтірілген.

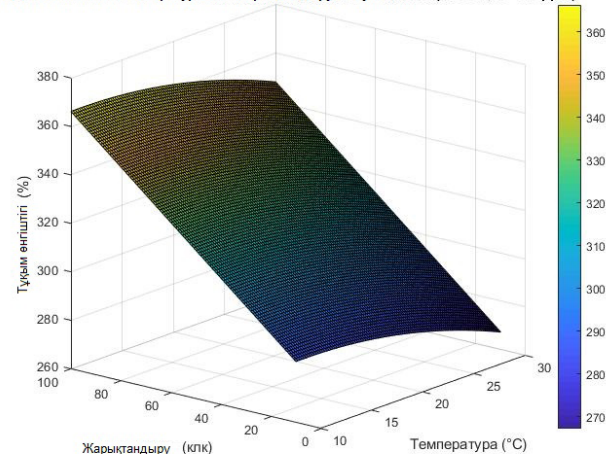


1-сурет – бекітілген L және C кезіндегі G(T, H) тәуелділігі

Суреттен көріп отырғаныңыздай, максималды өну 20–25°C және 50–60 % ылғалдылық диапазонында байқалады. (<15°C) төмен температурада биохимиялық процестердің баяулауына байланысты өну күрт төмендейді. (>70 %) жоғары ылғалдылықта тамыр аймағында оттегінің болмауына байланысты өсу баяулайды. Өзара әрекеттесу әсері T·H (0,02·T·H) жоғары температура мен ылғалдылықта өнгіштіктің жеке-жеке төмендейтінін көрсетеді. Бұл ретте Қостанай облысында өну үшін оңтайлы жағдайлар ~22°C және ылғалдылықтың 55% құрайды.

2-суретте өнгіштіктің температураға (T) және жарыққа (L) тұрақты ылғалдылыққа (H) және CO₂ (C) тәуелділігі көрсетілген.

Тұқым өнгіштігінің температура мен жарықтандыруға тәуелділігі (H=50%, C=400 ppm)

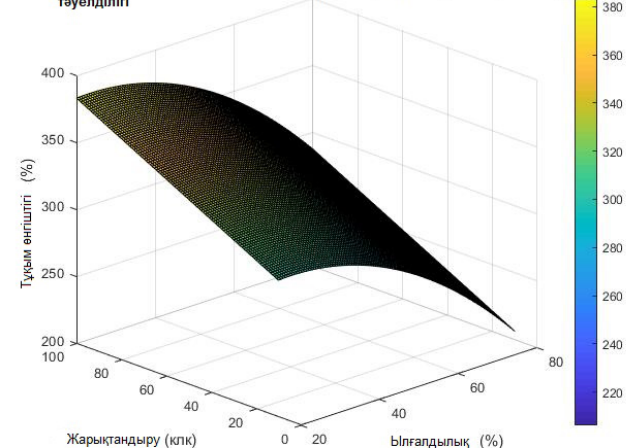


2-сурет – бекітілген H және C кезіндегі G(T, L) тәуелділігі

Жауап функциясының жуықтауынан көріп отырғаныңыздай, өнгіштік жарықтың жоғарылауымен өседі, бірақ 70–80 клк-тен жоғары өсу баяулайды. ($>25^{\circ}\text{C}$) жоғары температурада тіпті қатты жарық жылу стрессін өтемейді. ($L < 30$ клк) көлеңкеде оңтайлы температурада да өнгіштігі төмен. Суреттен максималды өну үшін 60–80 клк жарықтандыру және $20\text{--}24^{\circ}\text{C}$ температура қажет екенін көруге болады.

3-суретте өнгіштік функциясындағы регрессия теңдеуін өндеудің ылғалдылыққа (H) және жарықтандыруға (L) тұрақты температурада (T) және CO_2 (C) тәуелділігінің нәтижелері келтірілген.

Тұқым өнгіштігінің ылғалдылық пен жарықтандыруға тәуелділігі (T=20°C, C=400 ppm)



3-сурет – бекітілген T және C кезіндегі G(H, L) тәуелділігі

3-суреттен көріп отырғанымыздай, ($<30\%$) төмен ылғалдылықта өну деңгейі жоғары жарықта да төмендейді. 50–60 % ылғалдылықта және (>50 клк) жарықтандыруда максималды әсер байқалады. ($>70\%$) артық ылғалдылық саңырауқұлақ ауруларының қаупіне байланысты өнгіштігін төмендетеді. Сонымен қатар, ең жақсы көрсеткіштерге 50–60% ылғалдылық пен 60–80 клк жарықтандыру кезінде қол жеткізіледі.

Жүргізілген зерттеулер Қостанай облысының есептік-климаттық жағдайларын жанындағы жабық топырақ жағдайында өсімдіктердің өнгіштігі мен өнімділігіне орташа есеппен ылғалдылық көрсеткіштерін – 60 %, үй – жайлар ішіндегі орташа температура – 22°C және 60–80 клк шегінде жарық көрсеткіштерін пайдалануға болатындығын көрсетті.

Жылыжай параметрлерін бақылау кезінде жаңартылатын энергия көздерін пайдаланудың тиімділігін растау үшін Қостанай облысының Федоров ауданындағы қолданыстағы жылыжай мысалында ылғалдылық пен температуралық режимді түзету мақсатында күн энергиясын пайдалану моделі ұсынылды.

Ауданы 100 м^2 жылыжайда және қыста сыртқы ауаның орташа температурасында $-5^{\circ}\text{C} \dots -20^{\circ}\text{C}$ диапазонында жылу шығыны анықталды:

(3)

мұндағы: Q – жылу қуаты (Вт),

ΔT – жылыжайдың ішіндегі және сыртындағы температура айырмашылығы. $^{\circ}\text{C}$;

U – жылыжайдың қабырғалары мен шатыры арқылы жылу шығыны екі рет жылтыратылған кезде, $3 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$ қабылданады.

Нәтижесінде жылу шығыны $8,1 \text{ кВт}$ құрады, тәуліктік жылу қажеттілігі $194,4 \text{ кВт} \cdot \text{сағ/күн}$.

Пайдалы әрекет коэффициенті (ПЭК) $60\text{--}70\%$ тиімділікпен күн вакуумды құбырлы коллекторларды пайдалану және күніне $500\text{--}700 \text{ ватт} \cdot \text{сағ/м}^2$ өндіру кезінде $194,4 \text{ кВт} \cdot \text{сағ/күн}$ жабу үшін шамамен 65 м^2 коллектор қажет болады. Жазда артық жылу топырақта немесе су ыдыстарында жиналуы мүмкін.

$13,5 \text{ кВт} \cdot \text{сағ/күн}$ (екі желдеткіш, сорғы жүйесімен тамшылатып суару, жарық диодты LED-фитолампармен жарықтандыру және сервоприводтар мен датчиктерді басқару автоматикасы) жылыжайдың электр жүйелеріне арналған фотоэлектрлік панельдерді пайдалану кезінде қысқы өндірісі $1,5 \text{ кВт} \cdot \text{сағ/м}^2 \cdot \text{күн}$ панельдері ұсынылды. Жылыжайдың толық жүктемесін жабу кезінде панельдердің қажетті қуатын есептеу 9 м^2 құрады, оны Қостанай өңіріндегі бұлтты күндерді ескере отырып, 12 м^2 алаңға жоспарлауға болады.

Ылғалдылықты $50\text{--}60\%$ диапазонында басқару үшін өнімділігі 5 л/мин (300 л/сағ) және тәулігіне $200 \text{ Вт} \cdot \text{сағ/күн}$ қуат тұтынатын тамшылатып суару үшін күн сорғысын пайдалану ұсынылады. Артық ылғалдылықта құрғату процедурасын жүзеге асыру үшін желдеткіштер (тәулігіне $2 \text{ Вт} \cdot \text{сағ/күн}$) және адсорбциялық құрғатқыштар (тәулігіне $1 \text{ кВт} \cdot \text{сағ/күн}$) ұсынылады.

Температура мен ылғалдылықты басқарудың бүкіл жүйесі $20 \text{ кВт} \cdot \text{сағ}$ (LiFePO_4) батареялар арқылы $1\text{--}2$ бұлтты күн резервімен жұмыс істей алады. Жылу аккумуляторы 5000 л су ыдысы түрінде беріледі. Коллекторлардан артық жылуды сақтау үшін. Күндіз коллекторлар Радиаторлар мен еденді жылыту үшін суды қыздырады, панельдер желдеткіштерді, сорғыларды және фитолампарларды қуаттайды. Түнде резервуардағы жылу температураны сақтайды, ал батареялар сенсорлардың жұмысын және ең аз желдетуді қамтамасыз етеді.

Қорытынды

Қостанай облысында жабық топырақ жағдайында өсімдік шаруашылығының тиімділігін арттыру температураның, ылғалдылықтың және жарықтың экстремалды маусымдық ауытқулары бар күрт континенттік климатпен сипатталатын өңірлік климаттық ерекшеліктерді кешенді есепке алуды талап етеді.

Жүргізілген зерттеу тұқымның өнуін анықтайтын негізгі факторлар топырақ температурасы ($+18\text{...}+25^{\circ}\text{C}$), субстрат ылғалдылығы ($60\text{--}80\%$

ең төменгі ылғал сыйымдылығы), жарықтандыру ($10\text{--}15 \text{ клк}$) және CO_2 концентрациясы ($800\text{--}1000 \text{ ppm}$) екенін анықтады.

Осы оңтайлы диапазондардан ауытқулар өну энергиясының айтарлықтай төмендеуіне және өсімдіктердің стресстік жағдайларының қаупінің жоғарылауына әкеледі. Әзірленген көп факторлы регрессиялық модель $85\text{--}90\%$ деңгейінде максималды өнгіштікке $22\text{--}24^{\circ}\text{C}$ температурада, субстраттың ылғалдылығы $55\text{--}60\%$, $60\text{--}80 \text{ клк}$ жарықтандыруы және CO_2 $800\text{--}1000 \text{ ppm}$ концентрациясында қол жеткізілгенін көрсетті. Қостанай облысының жағдайлары үшін қараша–ақпан айларында міндетті түрде қосымша жарықтандыруды, жылу шығынын азайту үшін желден қорғайтын жүйелерді қолдануды, сілтілі топырақтың рН түзетуді және микроклиматты бақылаудың автоматтандырылған жүйелерін енгізуді қоса алғанда, экстремалды климаттық көріністерді өтеу жөніндегі шаралар ерекше маңызға ие.

Қостанай өңірінің есептік-климаттық жағдайлары үшін ЖЭК-ті жабық агрожүйелерде кешенді пайдалану микроклиматты дәл бақылау есебінен өнімділікті арттыруға мүмкіндік беріп қана қоймай, ауыл шаруашылығының орнықты моделіне көшуге де ықпал етуі мүмкін. Күн фотоэлектрлік жүйелері мен жылу қондырғыларын пайдалану тұрақты жылыту, жарықтандыру және тамшылатып суару жүйелерінің жұмысын қамтамасыз ету арқылы жылыжайларды энергиямен қамтамасыз етуді оңтайландыруға мүмкіндік береді.

Бұл әсіресе инсоляцияның жоғары деңгейі (жылына күннің $2200\text{--}3000$ сағатқа дейін) айтарлықтай техникалық және экономикалық әлеует туғызатын Қостанай өңіріне қатысты. Күн жылыжайларының болжамды деректері өсімдіктер үшін оңтайлы температура мен ылғалдылықты сақтай отырып, қазба отынына тәуелділіктің $40\text{--}60\%$ төмендеуін көрсетеді. Сонымен қатар, жел қондырғылары күн генерациясының үзілістерін өтей алады, әсіресе төмен инсоляция кезеңдерінде. Аймақ қалыпты жел потенциалына ие (желдің орташа жылдамдығы $4\text{--}6 \text{ м/с}$), бұл үздіксіз энергиямен қамтамасыз ету үшін «күн-жел» гибриді жүйелерін пайдалануға мүмкіндік береді. Органикалық қалдықтар негізінде топырақты және биогаз қондырғыларын жылыту үшін геотермалдық суларды одан әрі пайдалану энергия циклінің тұйықталуына ықпал етеді. Бұл CO_2 шығарындыларын азайтып қана қоймайды, сонымен қатар био тыңайтқыштарды қолдану арқылы топырақ сапасын жақсартыды.

Одан әрі зерттеулерді Қостанай облысы жағдайында оларды енгізудің экономикалық орындылығын ескере отырып, микроклиматты бейімдеудің энергия тиімді технологияларын әзірлеуге бағыттаған жөн.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

- 1 **Аутко, А. А.** Овощеводство защищенного грунта [Текст] / А. А. Аутко. – Минск: ВЭВЭР, 2016. – 320 с.
- 2 **Jones, H. G.** Plants and Microclimate: A Quantitative Approach to Environmental Plant Physiology [Text] / H. G. Jones. – 3rd ed. – Cambridge : Cambridge University Press, 2014. – 407 p.
- 3 **Гиш, Р. А.** Модернизация и совершенствование управления параметрами микроклимата – основа теплиц V поколения [Текст] / Р. А. Гиш, Е. Н. Карпенко // Научный журнал КубГАУ. – 2016. – № 123 (09). – С. 81–94.
- 4 **Zghal, O.** Numerical investigation of CFD parameters: Evaluating height variations on microclimate and crop performance in large-scale soilless greenhouses in northern Tunisia [Text] / O. Zghal, A. Ketata, H. Abid [et al.] // Journal of Engineering Research. – 2025. – P. 326–334.
- 5 **Nauta, A. A.** new greenhouse energy model for predicting the year-round interior microclimate of a commercial greenhouse in Ontario, Canada [Text] / A. Nauta, J. Han, S. H. Tasnim, W. D. Lubitz // Information Processing in Agriculture. – 2024. – Vol. 11, Issue 4. – P. 438–456.
- 6 **Arbaoui, N.** Effects of a solar heating system on the microclimate of an agricultural greenhouse. Application on zucchini (Cucurbita pepo) [Text] / N. Arbaoui, R. Tadili, I. Ihoume [et al.] // Solar Energy. – 2023. – Vol. 262. – P. 111910.
- 7 **Boughanmi, H.** Enhancing nocturnal microclimate in Tunisian greenhouses: Experimental study on integrating an innovative conic helicoidal heat exchanger with a geothermal heat pump system [Text] / H. Boughanmi, N. Khaldi, M. Lazaar, A. Guizani // Geothermics. – 2024. – Vol. 123. – P. 103127.
- 8 **Tiwari, S.** Thermal analysis of photovoltaic thermal integrated greenhouse system (PVTIGS) for heating of slurry in potable biogas plant: An experimental study [Text] / S. Tiwari, G. N. Tiwari // Solar Energy. – 2017. – Vol. 155. – P. 203–211.
- 9 **Sa, Q.** Effects and assessment of the combined application of biogas slurry and chemical fertilizers on greenhouse tomato growth, yield, and soil quality [Text] / Q. Sa, J. Zheng, K. Zhang, Y. Wang // Scientia Horticulturae. – 2025. – Vol. 344. – P. 114113.
- 10 **Vinoth Kumar, K.** Solar Powered Biogas Plant in Hilly Area Greenhouse – A Field Study [Text] / K. Vinoth Kumar, R. Kasturi Bai // Solar Energy. – 2008. – Vol. 82, Issue 10. – P. 911–917.
- 11 Костанайская область [Электронный ресурс] // Википедия – свободная энциклопедия. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Костанайская_область (Дата обращения: 06.05.2025).

- 12 **Афанасьева, Н. Ю.** Вычислительные и экспериментальные методы научного эксперимента [Текст] / Н. Ю. Афанасьева. – Москва : КноРус, 2017. – 192 с.
- 13 **Рустамов, Н. Т.** Математическая модель, основанная на передаточной функции системы распределенной генерации [Текст] / Н. Т. Рустамов, А. Н. Бергузинов, О. Д. Меирбекова, Г. А. Тулебаева // Торайғыров университетінің хабаршысы. Энергетикалық сериясы. – 2024. – № 2. – С. 340–355.

REFERENCES

- 1 **Autko, A. A.** Ovoshchevodstvo zashchishchennogo grunta [Greenhouse vegetable growing] [Text] / A. A. Autko. – Minsk : VEVER, 2016. – 320 p.
- 2 **Jones, H. G.** Plants and Microclimate: A Quantitative Approach to Environmental Plant Physiology [Text] / H. G. Jones. – 3rd ed. – Cambridge : Cambridge University Press, 2014. – 407 p.
- 3 **Gish, R. A.** Modernizatsiya i sovershenstvovanie upravleniya parametrami mikroklimata – osnova teplits V pokoleniya [Modernization and improvement of microclimate parameters management as the basis of fifth-generation greenhouses] [Text] / R. A. Gish, E. N. Karpenko // Nauchnyi zhurnal KubGAU. – 2016. – № 123 (09). – P. 81–94.
- 4 **Zghal, O.** Numerical investigation of CFD parameters: Evaluating height variations on microclimate and crop performance in large-scale soilless greenhouses in northern Tunisia [Text] / O. Zghal, A. Ketata, H. Abid [et al.] // Journal of Engineering Research. – 2025. – P. 326–334.
- 5 **Nauta, A. A.** new greenhouse energy model for predicting the year-round interior microclimate of a commercial greenhouse in Ontario, Canada [Text] / A. Nauta, J. Han, S. H. Tasnim, W. D. Lubitz // Information Processing in Agriculture. – 2024. – Vol. 11, Issue 4. – P. 438–456.
- 6 **Arbaoui, N.** Effects of a solar heating system on the microclimate of an agricultural greenhouse. Application on zucchini (Cucurbita pepo) [Text] / N. Arbaoui, R. Tadili, I. Ihoume [et al.] // Solar Energy. – 2023. – Vol. 262. – P. 111910.
- 7 **Boughanmi, H.** Enhancing nocturnal microclimate in Tunisian greenhouses: Experimental study on integrating an innovative conic helicoidal heat exchanger with a geothermal heat pump system [Text] / H. Boughanmi, N. Khaldi, M. Lazaar, A. Guizani // Geothermics. – 2024. – Vol. 123. – P. 103127.
- 8 **Tiwari, S.** Thermal analysis of photovoltaic thermal integrated greenhouse system (PVTIGS) for heating of slurry in potable biogas plant: An experimental study [Text] / S. Tiwari, G. N. Tiwari // Solar Energy. – 2017. – Vol. 155. – P. 203–211.

9 **Sa, Q.** Effects and assessment of the combined application of biogas slurry and chemical fertilizers on greenhouse tomato growth, yield, and soil quality [Text] / Q. Sa, J. Zheng, K. Zhang, Y. Wang // Scientia Horticulturae. – 2025. – Vol. 344. – P. 114113.

10 **Vinoth Kumar, K.** Solar Powered Biogas Plant in Hilly Area Greenhouse – A Field Study [Text] / K. Vinoth Kumar, R. Kasturi Bai // Solar Energy. – 2008. – Vol. 82, Issue 10. – P. 911–917.

11 **Kostanayskaya oblast [Kostanay Region]** [Electronic resource] // Wikipedia. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Kostanay_Region (accessed: 06.05.2025).

12 **Afanasyeva, N. Yu.** Vychislitelnye i eksperimentalnye metody nauchnogo eksperimenta [Computational and experimental methods of scientific research] [Text] / N. Yu. Afanasyeva. – Moscow : KNORUS, 2017. – 192 p.

13 **Rustamov, N. T.** Matematicheskaya model, osnovannaya na peredatochnoi funktsii sistemy raspredelennoi generatsii [A mathematical model based on the transfer function of a distributed generation system] [Text] / N. T. Rustamov, A. N. Berguzinov, O. D. Meirbekova, G. A. Tulebaeva // Toraygyrov universitetiniñ habarshysy. Energetikalyk seriyasy. – 2024. – № 2. – P. 340–355.

22.05.25 ж. баспаға түсті.

21.07.25 ж. түзетулерімен түсті.

08.09.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

Б. К. Сакенов¹, И. В. Кошкин^{2}, А. И. Успанова³, А. П. Кислов⁴*

^{1,2,3}Костанайский региональный университет имени

Ахмет Байтұрсынұлы, Республика Казахстан, г. Костанай

⁴Торайғыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар

Поступило в редакцию 22.05.25

Поступило с исправлениями 21.07.25

Принято в печать 08.09.25

ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ВИЭ ДЛЯ РЕГУЛИРОВАНИЯ УРОЖАЙНОСТИ РАСТЕНИЙ ЗАКРЫТОГО ГРУНТА В КОСТАНАЙСКОМ РЕГИОНЕ

В данной работе рассматривается использование возобновляемых источников энергии (ВИЭ) для оптимизации ключевых параметров урожайности растений в закрытом грунте на территории Костанайского региона. Актуальность данной темы обусловлена необходимостью обеспечения продовольственной безопасности

в условиях роста населения и глобального изменения климата. В исследовании анализируются возможности интеграции солнечной и ветровой энергетики, а также биогазовых установок для энергоснабжения теплиц. Особое внимание уделяется автоматизации контроля параметров микроклимата (температура, влажность, освещённость) с использованием ВИЭ, что позволяет минимизировать зависимость от ископаемых ресурсов и снизить себестоимость продукции.

Исследования показывают, что управление микроклиматом в замкнутых системах с применением ВИЭ может значительно повысить всхожесть и урожайность культур. В статье описываются современные подходы к регулированию температурных режимов, освещения и полива с использованием различных технологий, что позволяет эффективно адаптировать условия роста растений к их физиологическим потребностям. Также подчеркивается важность перехода на ВИЭ для достижения устойчивого сельского хозяйства и сокращения углеродных выбросов. В заключение, представлена методология интеграции ВИЭ в системы контроля урожайности, учитывающая климатические и ресурсные особенности Костанайского региона, что способствует развитию агросектора и повышению его технологической конкурентоспособности.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, энергетика, факторы, эксперимент, теплицы, климат, урожайность.

B. K. Sakenov¹, I. V. Koshkin^{2}, A. I. Uspanova³, A. P. Kislov⁴*

^{1,2,3}Kostanay Regional University named after Akhmet Baitursynuly,

Republic of Kazakhstan, Kostanay

⁴Toraighyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar

Received 22.05.25

Received in revised form 21.07.25

Accepted for publication 08.09.25

JUSTIFICATION OF THE USE OF RENEWABLE ENERGY SOURCES TO REGULATE THE YIELD OF INDOOR PLANTS IN THE KOSTANAY REGION

This paper examines the use of renewable energy sources (RES) to optimize key parameters of plant productivity in the enclosed ground in the Kostanay region. The relevance of this topic is due to the need to ensure food security in the context of population growth and global climate change.

The study analyzes the possibilities of integrating solar and wind energy, as well as biogas plants for power supply to greenhouses. Special attention is paid to automating the control of microclimate parameters (temperature, humidity, illumination) using renewable energy sources, which minimizes dependence on fossil resources and reduces the cost of production.

Research shows that microclimate management in closed systems using renewable energy sources can significantly increase germination and crop yields. The article describes modern approaches to regulating temperature conditions, lighting and irrigation using various technologies, which makes it possible to effectively adapt plant growth conditions to their physiological needs. It also highlights the importance of switching to renewable energy sources to achieve sustainable agriculture and reduce carbon emissions. In conclusion, the methodology for integrating renewable energy sources into yield control systems is presented, taking into account the climatic and resource characteristics of the Kostanay region, which contributes to the development of the agricultural sector and increasing its technological competitiveness.

Keywords: renewable energy sources, energy, factors, experiment, greenhouses, climate, productivity.

FTAMP 27.25.19

<https://doi.org/10.48081/CAEF3183>

**Ә. М. Сәбиболда¹, *Н. Қ. Смайлов², А. К. Тулешов³,
А. Б. Сағындық⁴, В. В. Наумов⁵**

^{1,2,3}Академик Ө.А. Жолдасбеков атындағы механика және машинатану институты, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.

²Satbayev University, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.

^{4,5}Торайғыров университеті, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1186-7940>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7264-2390>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9775-3049>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0376-2150>

⁵ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-5837-4683>

*e-mail: sabibolda98@gmail.com

РАДИОСИГНАЛДАРДЫ СПЕКТРЛІК- КОРРЕЛЯЦИЯЛЫҚ ӨНДЕУ МІНДЕТТЕРІ ҮШІН МАТЕМАТИКАЛЫҚ МОДЕЛЬДЕУ

Бұл мақалада физикалық және радиотехникалық жүйелердегі электромагниттік процестерді модельдеуге арналған зертханалық тәжірибелік жұмыстар қарастырылады. Зерттеу аясында радиосигналдарды спектрлік-корреляциялық әдістер арқылы өңдеудің алгоритмі әзірленіп, оның бағдарламалық жүзеге асырылуы сипатталады. Python тілінде құрылған бағдарлама кіріс параметрлерін өзгерту арқылы сигналдарды уақыттық және жиіліктік облыстарда талдауға мүмкіндік береді. Жасалған шешім блок-схема және графикалық интерфейс арқылы сипатталып, әртүрлі платформаларда қолдануға бейімделген. Мақалада корреляциялық анықтағыштың физикалық моделі мен радиосигналдардың уақыттық кідірісі, амплитудалық және фазалық сәйкестігін бағалау әдістері ұсынылған. Алгоритмнің тиімділігі шу жағдайында радиолокациялық мақсаттарды дәл анықтауда көрінеді. Сонымен қатар, алгоритмнің радиомониторинг және радиоимпеданстық зондау салаларында қолданылу нәтижелерінің графикалық интерпретациясы келтірілген. Модельдеу Ньютон әдісіне негізделген итерациялық шешімдерді

қамтиды және спектрлік сипаттамаларды визуализациялауға жағдай жасайды. Бағдарламалық кешен геоэлектрлік құрылымдарды қалпына келтіруде және радиофизика мен сигналдарды цифрлық өңдеу бағытында мамандар даярлауда оқыту құралы ретінде кеңінен қолдануға жарамды. Зерттеуде ұсынылған жүйе нақты есептер үшін бейімдеуге қолайлы және модульдік кеңейту мүмкіндігімен сипатталады. Сонымен қатар, әзірленген интерфейс студенттерге тәуелсіз жұмыс істеуіне және модельдеу дағдыларын тереңдетуге мүмкіндік береді.

Кілтті сөздер: радиопеленгация, спектралды-корреляциялық алгоритм, электромагниттік кедергілер, корреляциялық талдау.

Кіріспе

Мақаланың мақсаты – екі семестрлік зертханалық практикум мысалында сызықтық және сызықтық емес жүйелердегі электромагниттік процестерді компьютерлік модельдеудегі математикалық және физикотехникалық тәсілдердің байланысы мен ішкі бірлігін көрсету [1, 9–11-бб.]. ЖОО-да оқыту бізге жас мамандарды даярлаудағы артықшылықтары мен кемшіліктерін анық көруге, оларға дұрыс практикалық баға беруге және сол арқылы оқытудың тиімділігін арттыруға мүмкіндік береді.

Жоғары деңгейлі Python бағдарламалау тіліне негізделген сигнал корреляциясы үлкен көлемдегі деректерді зерттеу және талдаумен айналысатын сигналдарды өңдеу және жалпы техникалық ғылымдар мамандары үшін өте маңызды болып табылады. Бұл оларға сигналдарды корреляциялық өңдеуді визуализациялауға мүмкіндік береді, бұл деректерді талдау уақытын қысқартады және кез келген операциялық жүйені пайдалану кезінде олардың зерттеу дәлдігін жақсартады, бұл әзірленген бағдарламаның кросс-платформа екенін көрсетеді [2, 24–27-бб.; 3, 49-б.].

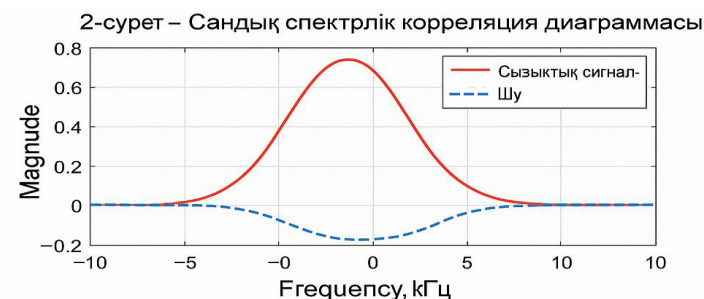
Зертханалық сабақтың құрылымын белгілі бір тәжірибелік жұмысқа енгізілген типтік тапсырмалар жиынтығы деп атаймыз, ал оңтайлы құрылым – студентке физикалық процестер мен құбылыстардың мәнін және олардың математикалық сипаттамасын барабар модель ретінде түсінуге мүмкіндік беретін тапсырмалар жиынтығы, ал мұғалім белгілі бір критерийді қанағаттандыратын тақырыпты игеру дәрежесі туралы объективті қорытынды жасайды [4, 37-б.].

Материалдар және әдістері

Радиосигналдарды спектрлік-корреляциялық өңдеуде сигналдардың өзара байланысын анықтайтын әдістер кеңінен қолданылады. Атап айтқанда, корреляциялық функциялар арқылы сигналдардың уақыттық және жиіліктік сәйкестігі зерттеледі. Бұл әдіс шулы ортада қажетті сигналды анықтауға

мүмкіндік береді [5, 74–78-бб.]. Уақыт-жиілік спектрлік бағалау және үлгіні тануға негізделген корреляциялық талдау тәсілдері де қолданылады [6, 19-б.].

Сигналдарды модельдеуде жоғары деңгейлі бағдарламалау тілдері (Python, Visual Basic) арқылы объектіге бағытталған тәсілдер пайдаланылады. Бұл платформа аралық құралдар зертханалық есептерді кез келген операциялық жүйеде орындауға мүмкіндік береді [7, 5–7-бб.]. Сонымен қатар, радиолокациялық жүйелерде қолданылатын цифрлық сигналдарды өңдеу әдістері арқылы күрделі электромагниттік процестерді модельдеуге болады [8, 10–11-бб.]. Бұл тәсілдер студенттерге зертханалық тәжірибелерде практикалық машықтарды игеруге жол ашады [9, 87-б.].



1-сурет – Сандық спектрлік-корреляциялық диаграммасы

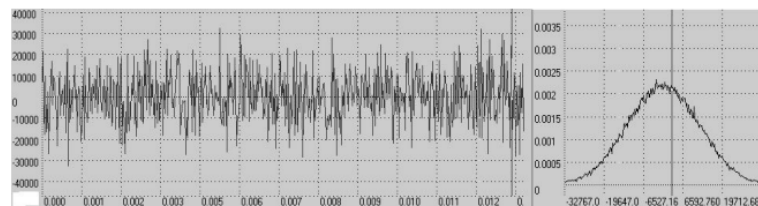
Бұл графикте сызықтық сигнал мен шу арасындағы спектрлік байланысты көрнекі түрде салыстыруға болады. Магнитуда мен жиілік осіндегі сызықтық сигналдар белгілі бір жиіліктерде айқын көрінсе, шу әртүрлі жиіліктерде кеңінен таралғандығын көрсетеді. Диаграмма арқылы сигналдың спектрлік құрамын жақсырақ түсінуге мүмкіндік береді, сондай-ақ шу мен сигналдың өзара әсерін бақылауға болады.

«Сигнал генераторы» белгілі математикалық модельдермен сынақ сигналдарын құрайды, мысалы:

$$\text{Гармоникалық сигнал: } s(t) = A_0 \cos(\sin \omega t + \sin \varphi) (\omega t + \varphi_n),$$

У амплитудасы, τ ұзақтығы және T қайталау кезеңі бар тікбұрышты импульстардың периодтық тізбегі $s(t) = s(t \pm nT)$

Гаусс шуы – амплитудалардың таралу ықтималдығының тығыздығы бар кездейсоқ процесс $p(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-u^2/(2\sigma^2)}$, мұндағы-дисперсия, σ^2 - СКО (2-сурет).



2-сурет – Гаусс шуы және амплитудалық таралу ықтималдығының тығыздығы

Тікелей есепті есептеу әдістемесі көлденең қабатты құрылымның бетіндегі жазық толқынның келтірілген беттік кедергісі тұжырымдамасына негізделген, оның көмегімен радио толқындарының таралуына қоршаған ортаның әсерін ескеруге болады:

$$\sigma = E_r / (H_r Z_0)$$

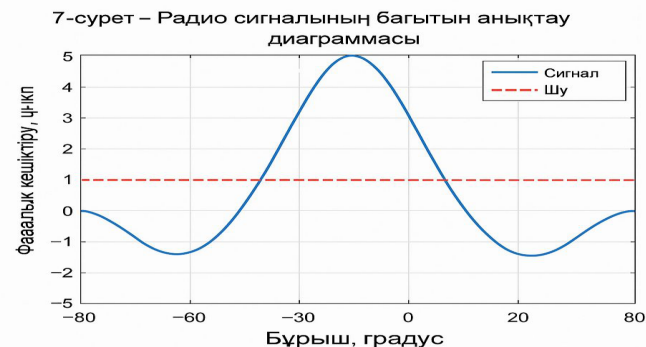
Мұндағы, E_r, H_r «ауа-жер» интерфейсындағы электр және магнит өрістерінің көлденең өзара перпендикуляр компоненттері [10, 65–69–66.].

Қарастырылып отырған функционалдылықты азайту Ньютон әдісімен жүзеге асырылды (сызықтық әдіс). Қолда бар жуықтау маңында А тікелей тапсырмасының операторын сызықтық түрде жүзеге асыра отырып, олар келесідей формуланы алды:

$$\Delta g = (B^T B + \alpha I)^{-1} \cdot (B^T \partial_3 + \alpha I g^0)$$

Мұндағы, А элементтері бар үшін В – Якоби матрицасы. Сызықтық теңдеулер жүйесін шешу үшін итерациялық процестің әр қадамында жалған конверсия әдісі қолданылды [11, 54–57–66.].

$$z = \int_{-\infty}^{\infty} y(t)x(t)dt$$



3-сурет – Радио сигналының бағытын анықтау диаграммасы

Радиосигнал бағытын анықтау диаграммасы антенналық жүйелерде қабылданатын сигналдардың бағытын дәл анықтауға мүмкіндік береді. Диаграммада әртүрлі жиіліктер мен бағыттағы сигналдардың күші көрсетіледі. Сигналдың түсу бағытын анықтау үшін амплитудалық үлестіру мен қабылдау бағыты арасындағы байланыс анализделеді. Бұл ақпарат мобильді байланыс жүйелерінде, ғарыштық зерттеулерде және әскери қолдануда өте маңызды болып табылады, себебі ол жүйелердің жұмыс тиімділігін арттырып, ресурстарды тиімді пайдалану мүмкіндігін береді.

Нәтижелер және талқылау

Радиолокациялық жүйелерде сигнал анықтағыштар қолданылады. Мұндай анықтаушыларда көбінесе күрделі ықтималдық коэффициентінің орнына қарапайым құрылымдық жеткілікті статистика есептеледі. Бұл статистиканы жеткілікті Статистика шегімен салыстыру шекті құрылымда жүзеге асырылады, содан кейін мақсаттың болуы немесе болмауы туралы шешім қабылданады.

ПИП бар радиолокациялық жүйелерде оны объектілерге сәулелендіру арқылы қалыптасады, корреляциялық интеграл жеткілікті статистика ретінде қолданылады. Бұл статистика айтарлықтай шу компоненті бар объектілердің болуын тиімдірек анықтауға мүмкіндік береді. Корреляциялық интегралды есептеу нәтижелері бойынша мақсаттың болуы немесе болмауы туралы шешім қабылданады.

Мұндағы, $y(t)$ – сигнал қабылдайды, $x(t)$ – мүмкін болатын сигналды қабылдайды [12, 37–38–66.].

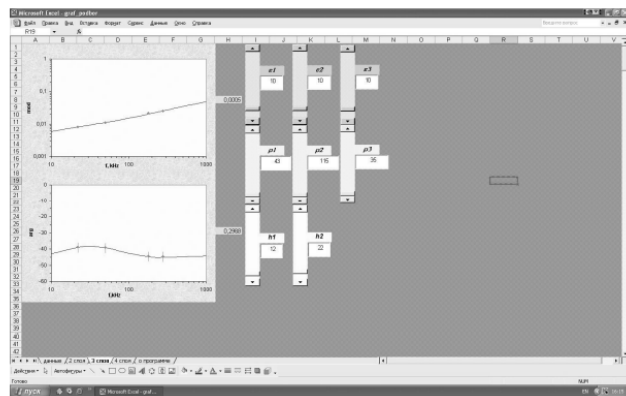
Көрсетілген алгоритм негізінде 1-суретте көрсетілген ПИП-пен сигналдың қарапайым бір арналы корреляциялық анықтағышының

құрылымдық схемасын жасауға болады. Бұл схема корреляциялық өңдеудің физикалық мағынасын түсінуге көмектеседі.

Пакеттік бағдарламалар Visual Basic for Applications объектіге бағытталған бағдарламалау тілі арқылы жасалады және Excel ортасында жұмыс істейді. Мәзір жүйесімен ыңғайлы графикалық интерфейс әр түрлі пайдаланушылардың жұмысын жеңілдетеді. Интерактивті режим жұмыстың әр кезеңінде интерпретация процесін басқаруға мүмкіндік береді [13, 95–105-66.].

Ұсынылған реттеуші алгоритм эксперименттік деректерді өңдеу және талдау процесінде өзінің тиімділігін көрсетті және жеткілікті күрделі геоэлектрлік кесінділердің құрылымын қалпына келтіруге мүмкіндік береді. Радиоимпедансты зондтаудың графикалық интерпретациялық бағдарламасы құрылды, параметрлерді анықтауға арналған (1-4) – беттік кедергінің жиіліктік тәуелділігі бойынша қабатты геоэлектрлік кесу (диэлектрлік өткізгіштіктер, меншікті кедергілер және қабаттардың қалыңдығы).

Студенттерге арналған зертханалық семинарда «мұз-тұзды (теңіз) су», «мұз-Тұщы су», «тау жотасындағы орман «және т.б. сияқты табиғи қабатты орталардың әртүрлі модельдері ұсынылған. Жер шарының жер аумағының шамамен 25% алып жатқан «мәңгілік мұз» ерекше қызығушылық тудырады. Мұздатылған жыныстардың бір ерекшелігі-өткізгіштігі төмен мұздатылған борпылдақ шөгінділердің электрлік қасиеттерінің айтарлықтай жиіліктік дисперсиясының болуы. Жалпы, зертханалық жұмыстар қызығушылықпен, жақсы бейімделумен және зерттелетін материалды игерумен жүргізілді. Өзірленген цифрлық бағдарламалық кешен көпфункционалдылығымен және әмбебаптығымен сипатталады.



5-сурет – 3 қабатты кесуге арналған радио-импеданс зондтау деректерін графикалық интерпретациялау бағдарламасының жұмыс терезесінің көрінісі.

Қаржыландыру туралы ақпарат

Осы жұмыс «Жас ғалым» ғылыми жобаларын гранттық қаржыландыру бағдарламасы аясында AP25794385 «Машиналық оқыту әдістерін қолдану арқылы пассивті радиопеленгацияның спектрлік-корреляциялық алгоритмді әзірлеу және енгізу» тақырыбы бойынша орындалды.

Қорытынды

Кең функционалдық мүмкіндіктері бар физика-техникалық жүйелердің спектрлік корреляциялық, статистикалық және электродинамикалық сипаттамаларын модельдеуге арналған зертханалық жұмыстар кешені әзірленді. Кешен «Радиоэлектроника негіздері», «Статистикалық радиофизика», «Радиотехникалық тізбектер мен сигналдар» курстарын оқуда пайдалы болып келеді. Сандық бағдарламалық жасақтама УИРС, курстық жұмыстар, дипломдық жұмыстар мен жобаларды орындау кезінде қолданылады. Сонымен, бұл бағдарлама сигналдарды өңдеу және жалпы техникалық ғылымдар саласындағы мамандар мен студенттер үшін өзекті құрал болып табылады, бұл оларға деректерді зерттеу мен талдауды тиімдірек жүргізуге, сондай-ақ корреляциялық әдістермен жұмыс істеу дағдыларын пысықтауға мүмкіндік береді.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

1 **Нагуслаева, И. Б.** Кездейсоқ электромагниттік үдерістердің статистикалық сипаттамалары: оқу-әдістемелік құрал. I бөлім / жауапты ред. Ю.Б. Башкуев. – Улан-Удэ: Бурят мемлекеттік университетінің баспасы, 2020. – 44 б.

2 **Новиков, А. А., Новиков, Н. А.** Цифровая обработка сигналов: учебное пособие. – М.: Юрайт, 2021. – 240 с.

3 **Кудрявцев, В.С., Конаков, В.Ф.** Корреляционный анализ в психологических исследованиях // Психологический журнал. – 2020. – Т. 33, № 5. – С. 63–76.

4 **Витязева, М. В., Рянкина, С. М., Хитров, Д. М.** Корреляционный метод в анализе временных рядов физиологических сигналов // Вестник СВФУ им. М.К. Аммосова. – 2021. – № 3. – С. 106–112.

5 **Бердышев, В. П., Гарин, Е. Н., Фомин, А. Н.** Радиолокационные системы. – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2022. – 402 с.

6 **Славков, М. В., Лавров, А. В.** Программное обеспечение для корреляционной обработки радиолокационных сигналов // Известия Томского политехнического университета. – 2020. – Т. 330, № 5. – С. 132.

7 **Ангархаева, Л. Х.** Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ №2006610089. Графическая интерпретация радиоимпедансного зондирования. – М.: РОСПАТЕНТ, 10.01.2022.

8 **Sclar, B.** Digital Communications: Fundamentals and Applications. – New Jersey: Prentice Hall, 2023. – 1011 p.

9 **Ципоренко, В. Г., Ципоренко, В. В., Андреев, О. В., Сабиболда, А. М.** Спектрально-корреляционный цифровой метод измерения задержки и пеленгации радиосигнала // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2021. – № 2(88). – С. 113–121.

10 **Eranti, P. K., Barkana, B. D.** A Review of Direction of Arrival (DOA) Estimation Methods Based on Adaptive Time-Frequency Distributions // Electronics. – 2022. – Vol. 11, No. 9. – Article 1321.

11 **Cameron, K. J., Pine, S. J.** A New Method for Far-Field Direction of Arrival Estimation Based on TDOA/FDOA Techniques // arXiv preprint arXiv:1808.04741, 2018.

12 **Tanti, H.A., Datta, A., Biswas, T., Tripathi, A.** Machine Learning-Based Radio Signal Localization Algorithm for Three-Axis Antenna Configurations // arXiv preprint arXiv:2409.20209, 2024.

13 **Al Hajri, M. I., Alouini, M. S.** Accurate and Robust Localization Methods in Wireless Sensor Networks // arXiv preprint arXiv:1806.05765, 2018.

REFERENCES

1 **Naguslaeva, I. B.** Kezdeisok elektromagnittik üderisterdin statistikalik sipattamalary: oqu-ädistemelik qural. I bölim [Statistical characteristics of random electromagnetic processes: teaching-methodical guide. Part I]. Buriat memlekettik universitetinin baspasy. – Ulan-Ude, 2020. – 44 p.

2 **Novikov, A. A., Novikov, N. A.** Tsifrovaia obrabotka signalov: uchebnoe posobie [Digital signal processing: a textbook]. Iurait. – Moscow, 2021. – 240 p.

3 **Kudriavtsev, V. S., Konakov, V. F.** Korreliatsionnyi analiz v psikhologicheskikh issledovaniyakh [Correlation analysis in psychological research]. Psikhologicheskii zhurnal. – Vol. 33, No. 5, 2020. – pp. 63–76.

4 **Vitiyazeva, M. V., Riankina, S. M., Khitrov, D. M.** Korreliatsionnyi metod v analize vremennykh riadov fiziologicheskikh signalov [Correlation method in analysis of physiological signal time series]. Vestnik SVFU im. M.K. Ammosova. – No. 3, 2021. – pp. 106–112.

5 **Berdyshev, V. P., Garin, E. N., Fomin, A. N.** Radiolokatsionnye sistemy [Radar systems]. Sibirskii federal'nyi universitet. – Krasnoyarsk, 2022. – 402 p.

6 **Slavkov, M. V., Lavrov, A. V.** Programmnoye obespechenie dlia korreliatsionnoi obrabotki radiolokatsionnykh signalov [Software for correlation

processing of radar signals]. Izvestiia Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. – Vol. 330, No. 5, 2020. – P. 132.

7 **Angarkhaeva, L.Kh.** Svidetel'stvo o registratsii programmy dlia EVM No. 2006610089. Graficheskaiia interpretatsiia radioimpedansnogo zondirovaniia [Certificate of registration of computer software No. 2006610089. Graphical interpretation of radio impedance sounding]. ROSPATENT. – Moscow, 2022.

8 **Sclar, B.** Digital Communications: Fundamentals and Applications. Prentice Hall. – New Jersey, 2023. – 1011 p.

9 **Tsyoporenko, V. G., Tsyoporenko, V. V., Andreev, O. V., Sabibolda, A. M.** Spektral'no-korreliatsionnyi tsifrovoy metod izmereniia zaderzhki i pelengatsii radiosignala [Spectral-correlation digital method for measuring radio signal delay and direction finding]. Vostochno-Evropeskii zhurnal peredovykh tekhnologii. – No. 2(88), 2021. – P. 113–121.

10 **Eranti, P. K., Barkana, B. D.** A Review of Direction of Arrival (DOA) Estimation Methods Based on Adaptive Time-Frequency Distributions. Electronics. – Vol. 11, No. 9, 2022. – Article 1321.

11 **Cameron, K. J., Pine, S. J.** A New Method for Far-Field Direction of Arrival Estimation Based on TDOA/FDOA Techniques. arXiv preprint arXiv:1808.04741, 2018.

12 **Tanti, H.A., Datta, A., Biswas, T., Tripathi, A.** Machine Learning-Based Radio Signal Localization Algorithm for Three-Axis Antenna Configurations. arXiv preprint arXiv:2409.20209, 2024.

13 **Al Hajri, M.I., Alouini, M. S.** Accurate and Robust Localization Methods in Wireless Sensor Networks. arXiv preprint arXiv:1806.05765, 2018.

13.05.25 ж. баспаға түсті.

08.07.25 ж. түзетулерімен түсті.

05.09.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

*А. М. Сабиболда¹, *Н. К. Смайлов², А. К. Тулешов³,*

А. Б. Сағындық⁴, В. В. Наумов⁵

^{1,2,3}Институт механики и машиноведения имени академика

У. А. Джолдасбекова, Республика Казахстан, г. Алматы

²Satbayev University, Республика Казахстан, г. Алматы

^{4,5}Торайғыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар

Поступило в редакцию 13.05.25

Поступило с исправлениями 08.07.25

Принято в печать 05.09.25

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЛЯ ЗАДАЧ СПЕКТРАЛЬНО-КОРРЕЛЯЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ РАДИОСИГНАЛОВ

В данной статье рассматриваются лабораторные практические работы, предназначенные для моделирования электромагнитных процессов в физических и радиотехнических системах. В рамках исследования разработан алгоритм спектрально-корреляционной обработки радиосигналов и описана его программная реализация. Программа, созданная на языке Python, позволяет анализировать сигналы во временной и частотной областях путём изменения входных параметров. Разработанное решение представлено через блок-схему и графический интерфейс, адаптировано для многоплатформенного использования. В статье предложены физическая модель корреляционного детектора и методы оценки временной задержки, амплитудного и фазового соответствия радиосигналов. Эффективность алгоритма проявляется в условиях шума при точном определении радиолокационных целей. Также приведены результаты графической интерпретации применения алгоритма в области радиомониторинга и радиоимпедансного зондирования. Моделирование основано на итерационных решениях по методу Ньютона и позволяет визуализировать спектральные характеристики. Программный комплекс пригоден как учебный инструмент при восстановлении геоэлектрических структур и подготовке специалистов в области радиофизики и цифровой обработки сигналов. Представленная система легко адаптируется под конкретные задачи и обладает модульной расширяемостью. Кроме того, разработанный интерфейс даёт студентам возможность самостоятельной работы и углубления навыков моделирования.

Ключевые слова: радиопеленгация, спектрально-корреляционный алгоритм, электромагнитные помехи, корреляционный анализ.

*A. M. Sabibolda¹, *N. K. Smailov², A. K. Tuleshov³,*

A. B. Sagyndyk⁴, V. V. Naumov⁵

^{1,2,3}Institute of Mechanics and Engineering named after Academician

U. A. Zholdasbekov, Republic of Kazakhstan, Almaty

²Satbayev University, Republic of Kazakhstan, Almaty

^{4,5}Toraighyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar

Received 13.05.25

Received in revised form 08.07.25

Accepted for publication 05.09.25

MATHEMATICAL MODELING FOR SPECTRAL-CORRELATION PROCESSING OF RADIO SIGNALS

This article examines laboratory practical works designed for modeling electromagnetic processes in physical and radio engineering systems. The research presents a developed algorithm for spectral-correlation processing of radio signals and describes its software implementation. The program, written in Python, allows for signal analysis in both time and frequency domains by adjusting input parameters. The proposed solution is structured through a block diagram and graphical interface and is adapted for cross-platform use. The article introduces the physical model of a correlation detector and methods for evaluating radio signal delay, amplitude, and phase matching. The algorithm demonstrates effectiveness under noise conditions for accurately detecting radar targets. Additionally, the results of graphical interpretation of its application in radiomonitoring and radio impedance sounding are provided. The modeling is based on Newton's method using iterative solutions and supports spectral characteristic visualization. The software package is suitable as a teaching tool for restoring geoelectric structures and training specialists in radiophysics and digital signal processing. The system is easily adaptable for specific computational tasks and features modular expandability. Furthermore, the developed interface enables students to work independently and deepen their modeling skills through interactive simulation environments.

Keywords: radiodirection finding, spectral-correlation algorithm, electromagnetic interference, correlation analysis.

<https://doi.org/10.48081/WJKE2565>

**А. А. Поддубный¹, Н. А. *Какабаев², А. Т. Кабдулина³,
Ж. Ж. Байжолова⁴, Р.А. Поддубный⁵**

^{1,2,3,4,5} Кокшетауский университет им. Ш. Уалиханова,

Республика Казахстан, г. Кокшетау

¹ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-0096-1891>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3892-9590>

³ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-5077-4062>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-9535-1626>

⁵ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-2008-4377>

*e-mail: nurbol.ka@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЕРЕНОСА ТЕПЛОТЫ ПРИ ДВИЖЕНИИ ГАЗО-ЖИДКОСТНЫХ СИСТЕМ В ВЕРТИКАЛЬНЫХ ТРУБАХ

В статье рассматривается задача переноса теплоты в газожидкостных (пенных) системах, в широком диапазоне изменения газосодержаний вплоть до 0,7 (70% газа), при нисходящем движении устойчивых газожидкостных (пенных) потоков в вертикальных трубах в различных тепловых установках. В данной работе также рассматривается вопрос определения коэффициента теплоотдачи от стенки теплообменных элементов к нисходящему газожидкостному потоку или наоборот от рассматриваемого потока к стенке.

Исследуемый пенный поток имеет эмульсионную (капельную) мелкодисперсную структуру, движущийся со скоростью $0,4 \div 1,4$ м/с. Газосодержание такого потока постоянно по сечению. С целью получения уравнений для расчёта коэффициентов теплообмена при движении данного потока используются полумпирический метод. Предложена физическая модель процесса переноса теплоты для данного случая. Получены уравнения для расчёта коэффициента теплоотдачи. В них внесены соответствующие экспериментальные коэффициенты. Полученные расчётные зависимости подтверждены экспериментальными исследованиями авторов и другими независимыми исследованиями.

В результате исследований установлено что коэффициент теплоотдачи при нисходящем движении устойчивых пенных систем, при газосодержании от 0,2 до 0,7, уменьшается с увеличением объёмного содержания газа, достигая самых низких значений при $\varphi_{гж} = 0,7$. Процесс теплоотдачи зависит от теплопроводности пенной смеси, особенно в пристенном слое. Относительное движение фаз оказывает пренебрежимо малое влияние на процесс переноса теплоты.

Данные теоретические исследования и полученные уравнения могут быть использованы для расчёта теплообменных аппаратов, теплового расчёта химических, биологических реакторов и другой аппаратуры.

Ключевые слова: газожидкостной поток, турбулентный, теплоперенос, коэффициент теплоотдачи, газосодержание, диссипация энергии, пенный поток.

Введение

Перенос теплоты при движении устойчивых газожидкостных (пенных) потоков с газосодержанием до 0,7 (70%) изучен не достаточно полно. Основной задачей, в данном случае, является теоретическое определение коэффициента теплоотдачи α от пенных потоков, при их нисходящем движении в вертикальных трубах. Решение поставленной проблемы рассматривалось в работах [1, с.27; 2, с.24, с.71; 3, с.158; 4, с.71]. Однако, проблема переноса теплоты в рассматриваемых системах достаточно сложна и требует продолжения исследований и получения простейших расчётных зависимостей для инженерной практики.

Цель исследования: получение расчётных зависимостей для определения коэффициента теплоотдачи от устойчивой газожидкостной смеси, с газосодержанием – $\varphi_{гж} = 0,2 \div 0,7$, при её нисходящем движении в вертикальных трубах к стенке трубы или для теплообменной поверхности, или наоборот от стенки трубы к пенной смеси.

Задачи:

- 1 Создание физической модели процесса теплоотдачи.
- 2 Получение наиболее простых расчётных зависимостей для инженерной практики.
- 3 Выявить основные факторы влияющие на процесс теплообмена и оценить их значение.
- 4 Сравнить полученные результаты с имеющимися экспериментальными данными и данными других исследований.

Материалы и методы

Для решения рассматриваемых задач применим полуэмпирический метод, основанный на физической модели процесса, с дальнейшим её математическим описанием. Сформируем физическую модель процесса переноса теплоты от стенки аппарата к движущейся пенной смеси. Движение такой смеси в трубе считаем турбулентным. Ламинарный режим маловероятен, так как в водной пенной смеси практически всегда будут происходить пульсации из-за взаимодействия фаз жидкость-газовые пузырьки.

Для дальнейшего рассмотрения процесса переноса теплоты воспользуемся моделями и методами расчёта турбулентного пограничного слоя в однофазных и многофазных потоках [1, с.20; 3, с.62, с.136; 5, с.7; 6, с.520].

Предположим, что устойчивый газожидкостный поток, состоит из мелких газовых пузырьков и прослоек жидкости между ними. Распределение фаз в таком потоке равномерное. Диаметры шаровых пузырьков близки. Газосодержание фгж рассматриваемого потока постоянно по сечению трубопровода [3, с.77] и по высоте. По высоте потока свойства пенной среды однородны и изотропны.

При движении в трубах (каналах) структура по сечению трубы (канала), рассматриваемого газожидкостного потока будет включать: пристенный пограничный слой и турбулентное ядро. Пограничный слой состоит из вязкого ламинарного подслоя и буферного слоя, которые также, как и основной поток, состоят из прослоек жидкости и пузырьков газа. Основное термическое сопротивление сосредоточено в вязком ламинарном подслое и зависит от теплофизических свойств пенной смеси (коэффициента теплопроводности, теплоёмкости, плотности). Турбулентное ядро представляет собой совокупность турбулентных вихрей разного размера, состоящих из жидкости и пузырьков газа.

Данная структура не является статической. Постоянно идёт обмен турбулентными пульсациями. В вязком ламинарном подслое сочетается молекулярный перенос с затухающей турбулентной диффузией [7, с.139]. В буферном слое перенос теплоты осуществляется за счёт молекулярной и молярной теплопроводности. Турбулентные пульсации, возникающие, в ядре потока, приводят к интенсивному перемешиванию среды в самом ядре, будоражат буферный слой, проникают в ламинарный подслой вплоть до стенки [3, с.137; 6, с.710] и приводят к образованию в нем возмущений (вихрей), что существенно интенсифицирует процесс переноса теплоты. В пенном турбулентном потоке происходит проскальзывание фаз с относительной скоростью [4, с.79], которое приводит к дополнительному вихреобразованию

во всём объёме. Пульсации в потоке передаются частицами пенной смеси, состоящими из жидкости и пузырьков газа, и имеющих плотность $\rho_{гж}$. Пузырьки газа в жидкости мелко диспергированные, являются жёсткими, и предполагаем (гипотеза), что они активно участвуют в передаче энергии турбулентных пульсаций. Однако в буферном слое возможно скопление части пузырьков, вдоль которых происходит проскальзывание потока смеси. Они также могут играть роль демпферов, гася турбулентные пульсации. Эти процессы опосредованно уменьшают касательные напряжения на стенке. Учтём данный эффект (гипотеза) коэффициентом α в котором значение показателя n определим при сравнении данной модели с экспериментальными данными.

Для описания предложенной модели и получения расчётных зависимостей воспользуемся подходом и уравнениями исследователей [1, с.28; 3, с.143, с.156; 5, с.7; 6, с.710]. Учёными [3, с.147] для расчёта теплообменных процессов, как для однофазных, так и многофазных потоков в любых аппаратах предложено уравнение:

$$Nu = 0,18 \eta_m^{0,95} \cdot Pr^{0,33} \quad (1)$$

В формуле (1) η_m – безразмерный максимальный масштаб турбулентности, пропорциональный радиусу аппарата, $Pr_{гж}$ – критерий Прандтля для пенного потока, учитывает влияние теплофизических свойств на теплообмен, Nu – критерий Нуссельта, служит для определения коэффициента теплоотдачи α .

$$\eta_m = \frac{u_* d_{тр} \rho_{гж}}{2 \mu_{ж}} \quad (2)$$

$$Pr_{гж} = \frac{c_{гж} \mu_{ж}}{\lambda_{гж}} \quad (3)$$

$$Nu = \frac{\alpha d_{тр}}{\lambda_{гж}} \quad (4)$$

В формулах (2), (3), (4) u_* – динамическая скорость, $d_{тр}$ – диаметр трубы (аппарата), $\rho_{гж}, \mu_{ж}$ – соответственно, плотность газожидкостной смеси и вязкость жидкости, $c_{гж}$ – теплоёмкость газожидкостной смеси, $\lambda_{гж}$ – коэффициент теплопроводности газожидкостной смеси.

Динамическая скорость равна [1, с.23]:

$$u_* = \sqrt[4]{\frac{v_{гж} E_0}{\rho_{гж}}} \quad (5)$$

В формуле (5) $v_{гж}$ – кинематическая вязкость пенного потока, – диссипация энергии в газожидкостной смеси, вызванная турбулентными пульсациями.

В рассматриваемой модели источником турбулизации являются: касательные напряжения на стенке и относительное движение фаз [3, с.158]. Учитывая эти факторы, суммарную диссипацию энергии E_0 , определим по уравнению

$$E_0 = E_{01} + E_{02} \quad (6)$$

E_{01} – диссипация энергии, вызванная касательными напряжениями на стенке. диссипация энергии в жидкости, обусловленная проскальзыванием фаз относительно друг друга. E_{02} Диссипацию энергии в жидкости, в пограничном слое E_{01} найдём, пользуясь формулой [1, с.23]

$$E_{01} = \frac{\tau_{гж}^2}{\mu_{ж}}, \quad (7)$$

где $\tau_{гж}$ – касательные напряжения, возникающие при движении устойчивого пенного потока.

Диссипацию энергии в жидкости, обусловленную относительным движением газа, E_{02} найдем пользуясь рекомендациями [1, с.90; 3, с.156], по уравнению

$$E_{02} = \kappa^4 \rho_{ж} g u_{г.от} \quad (8)$$

В формуле (8) κ – коэффициент пропорциональности, учитывает изотропность турбулентности, $u_{г.от}$ – относительная скорость мелкодисперсных пузырьков газа.

В рассматриваемом турбулентном потоке будем считать давление, скорость и газосодержание осреднёнными по времени. Газосодержание также будем считать осреднённым по давлению.

В этом случае, пользуясь предложенной выше нами моделью, а также известными в гидродинамике моделями Рейнольдса-Буссинеска и Прандтля [6, с.623] и их решениями, и решениями исследователей [1, с.89-91; 3, с.148; 5, с.9; 8, с.47-53], касательные напряжения предлагаем определять по уравнению

$$\tau_{гж} = \frac{0,3164}{(v_{гж} d_{тр} \rho_{гж} / \mu_{ж})^{0,25}} \cdot \left(\frac{1+2\varphi_{гж}}{1-\varphi_{гж}} \right) \cdot (1-\varphi_{гж})^n \cdot \kappa_1 \frac{\rho_{гж} w_{гж}^2}{8}, \quad (9)$$

где κ_1 – коэффициент извилистости каналов в элементарной струйке $w_{гж}$, – средняя скорость движения газожидкостной смеси, $\rho_{гж} = \rho_{ж}(1 - \varphi_{гж}) + \rho_{г}\varphi_{гж}$ – плотность газожидкостной смеси.

Коэффициент извилистости κ_1 очевидно зависит от газосодержания пенной смеси. Детальное исследование его значения проведено в работе [9, с.23]. Авторами предложена следующая формула для определения коэффициента извилистости.

$$\kappa_1 = 1 + \left(\frac{\pi}{2} - 1 \right) \cdot \varphi_{гж}^{2/3}, \quad (10)$$

Анализируя данную формулу, с учётом исследований [10, с.44] и самих авторов статьи, необходимо отметить, что формула работает при газосодержании от 0,5 до 0,7. После корректировки рекомендуем принимать коэффициент извилистости: при содержании газа $\varphi_{гж} = 0,4$ $\kappa_1 = 1,175$, $\varphi_{гж} = 0,3$ $\kappa_1 = 1,61$ при $\varphi_{гж} = 0,2$ $\kappa_1 = 1$.

Пользуясь рекомендациями [4, с.79], относительную скорость скольжения фаз для устойчивой пенной смеси определим по формуле

$$u_{г.от} = \left[\frac{3(1-1,5\sqrt[3]{\varphi} + 1,5\sqrt[3]{\varphi^5} - \varphi^2)}{3+2\sqrt[3]{\varphi^5}} \cdot \frac{d_{п}^2}{2g\mu_{ж}\varphi} \right] \cdot \frac{dp}{d\ell} \quad (11)$$

В формуле (11) $d_{п}$ – средний диаметр пузырьков газа. Для пенных смесей движущихся в нисходящем потоке надёжных зависимостей для определения среднего диаметра пузырька нет, поэтому следует его брать из опыта эксплуатации. Для устойчивой пенной смеси его размеры варьируются в районе 2-4 мм.

Анализ структуры пенной смеси позволяет предположить, что при $\varphi_{гж} \geq 0,74$ начнёт формироваться сферическая ячеистая пена, и естественно в данном случае говорить о наличии относительной скорости не имеет смысла.

Величину $\frac{dp}{d\ell}$ можно найти через касательные напряжения, определяемые по формуле (9), учитывая что $\Delta P/\ell = 4\tau/d_{тр}$. Значение E_0 , с учётом выражений для E_{01} и E_{02} будет равно

$$E_0 = \frac{\tau_{гж}^2}{\mu_{ж}} + \kappa^4 \rho_{ж} g u_{г.от} \varphi_{гж} \quad (12)$$

Подставляя формулу (12) в уравнение (5) найдём выражение для расчёта динамической скорости

$$u_* = \frac{4}{\sqrt{\rho_{гж}}} \sqrt{\frac{\tau_{гж}^2}{\rho_{гж}} + \frac{\kappa^4 g \rho_{ж} u_{г.от} \varphi_{гж}}{(1-\varphi_{гж})}} \quad (13)$$

Рассчитывая динамическую скорость (13), с учётом формул (9), (11), по формуле (2) определим безразмерный максимальный масштаб турбулентности η_m . Подставляя полученное значение в уравнение (1), определим критерий Нуссельта и коэффициент теплоотдачи α от устойчивой газожидкостной смеси.

Параметры, входящие в расчётные формулы, определим следующим образом. Коэффициент теплопроводности газожидкостного потока можно определить по формуле Максвелла, приведённой в литературе [8, с.70], которая записывается в виде

$$\lambda_{гж} = \lambda_{ж} \left[1 + \frac{\varphi_{гж}}{\frac{1-\varphi_{гж}}{3} + \lambda_{ж}/(\lambda_{г} - \lambda_{ж})} \right]$$

Теплоёмкость газожидкостной смеси при $\varphi_{гж} < 0,99$ равна теплоёмкости жидкости. Значение коэффициента χ можно принять равным 1, так как турбулентность мелкодисперсной пенной системы близка к изотропной. Определяющей температурой будем считать температуру ламинарного подслоя. Определяющий размер – диаметр трубы.

Результаты и обсуждение

С целью анализа уравнения (1) и его составляющих сделаны расчёты для определения коэффициента теплоотдачи от стенки трубы диаметром 50 мм к нисходящему пенному потоку в вертикальной трубе. Теоретические исследования были проведены для пенной системы, которая была получена на водной среде с добавлением ПАВ. Температура принималась 3100К. Газосодержание пенной смеси варьировалось от 0,2 до 0,7. Скорость движения пенной смеси принималась равной от 0,5 м/с до 1,3 м/с. Результаты исследований представлены на Рис.3. Полученные результаты также сравнивались с данными уравнения по определению коэффициента теплоотдачи для пенных систем, полученного экспериментальным путём, и в книге [2, с.78]:

$$\alpha = 5,5 \cdot 10^3 [(1 - \varphi_{гж}) w_{гж}^m + 1,63 \varphi_{г}], \quad (14)$$

Показатель степени $m = \varphi_{гж}^{-1,43}$. Уравнение (14) действительно при газосодержании пенной смеси от 0,4 до 0,7, при скорости движения $w_{гж} = 0,2 \div 1$ м/с. Для пенной смеси содержание барботирующего газа $\varphi_{г} = 0$.

Полученные зависимости для определения коэффициента теплоотдачи α (1,4), с учётом уравнений (2), (3), (9), (11), (13) и принятым показателем n

$= 0,45$ в уравнении (9), подтверждены экспериментально исследованиями [8, с.119], и результатами, полученными по уравнению (14), рис.1, рис.2. Погрешность между экспериментальными и теоретическими данными, в основном, не превышает 20 %.

Подтверждено применение уравнения (1) для расчёта коэффициента теплоотдачи α от пенных нисходящих потоков с газосодержанием $\varphi_{гж}$ от 0,2 до 0,7.

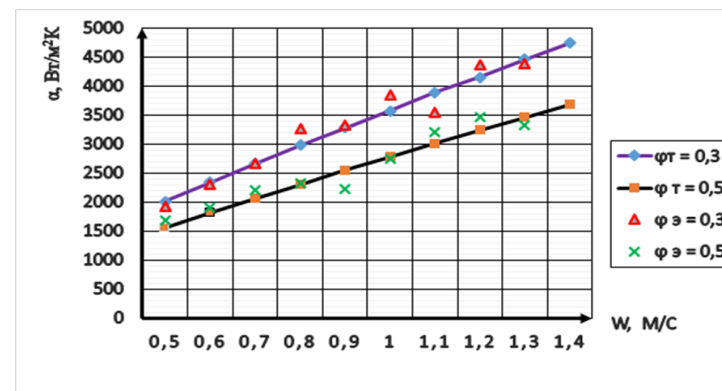


Рисунок 1 – Сравнение результатов, полученных по уравнению (1) [3], с учётом зависимостей (2), (3), (8), (11), (13) с экспериментальными данными [2, с.78; 8, с.119] для газосодержаний $\varphi_{гж} = 0,3$, $\varphi_{гж} = 0,5$

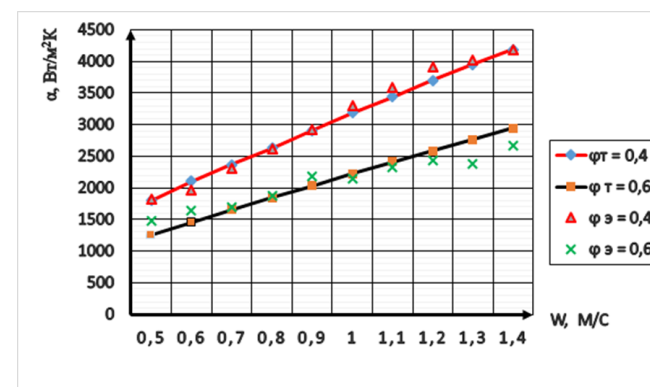


Рисунок 2 – Сравнение результатов, полученных по уравнению (1) [3, с.147], с учётом зависимостей (2), (3), (4) (9), (11), (13) с экспериментальными данными [2, с.78; 8, с.119] для газосодержаний $\varphi_{гж} =$

$$0,4, \varphi_{гж} = 0,6$$

Проведённые исследования показывают, что коэффициент теплоотдачи при нисходящем движении устойчивых пенных систем, при газосодержании от 0,2 до 0,7, уменьшается с увеличением объёмного содержания газа, достигая самых низких значений при $\varphi_{гж} = 0,7$, рис.3. С нашей точки зрения уменьшение коэффициента теплоотдачи объясняется значительным влиянием теплофизических свойств рассматриваемой среды на теплообмен. Турбулентные пульсации передаются частицами пенной смеси, имеющей плотность $\rho_{гж}$, которая уменьшается с увеличением газосодержания, соответственно уменьшается и величина пульсаций. Процесс теплоотдачи зависит от теплопроводности пенной смеси, особенно в пристенном слое. Расчёты показывают значительное её понижение в зависимости от содержания газа в пенной смеси. Проведённый анализ показал пренебрежимо малое влияние относительного проскальзывания фаз на коэффициент теплоотдачи. Это объясняется устойчивостью полученной газожидкостной смеси, содержащей мелко диспергированные пузырьки газа, движущиеся практически со скоростью такой же, как и прослойки жидкости. Наши исследования показали возможность применения полуэмпирического метода решения рассматриваемой задачи, для инженерных расчётов процессов переноса теплоты в пенных системах.

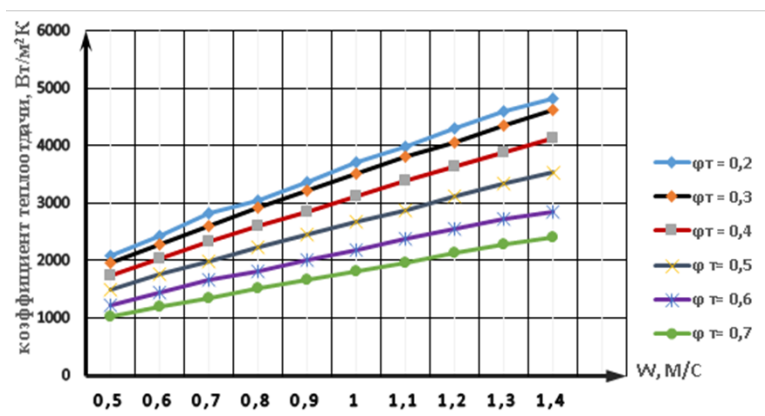


Рисунок 3 – Зависимость коэффициента теплоотдачи α от скорости движения пенной смеси $w_{гж}$ при газосодержании $\varphi_{гж} = 0,2 \div 0,7$.

Выводы

В результате исследований предложена физическая модель про-

цесса теплоотдачи от сложной пенной смеси с газосодержанием от 0,2 до 0,7. Для её описания применён полуэмпирический метод, основанный на уравнении (1) и применении диссипации энергии для определения основных параметров потока и коэффициента теплоотдачи. Получены расчётные зависимости для определения касательных напряжений (9), динамической скорости (13), позволяющие по уравнениям (1,4) определить коэффициент теплоотдачи для рассматриваемых систем. Данные зависимости являются достаточно простыми для инженерной практики. В некоторых исследованиях подтверждаются выше приведенная модель и выводы [11, 12]. Показано, что основными факторами влияющими на процесс теплообмена являются газосодержание пенной смеси, скорость движения и теплофизические свойства газожидкостной смеси. Полученные результаты теоретических исследований подтверждаются экспериментальными данными, в том числе проведённые другими авторами.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Соколов, В. Н., Доманский, И. В. Газожидкостные реакторы [Текст] – Л. : Машиностроение, 1976. – 216с.
- 2 Соколов, В. Н., Яблокова, М. М. Аппаратура микробиологической промышленности [текст] –Л. : Машиностроение, 1988. – 278с.
- 3 Тишин, В. Б., Новосёлов, А. Г., Головинская, О. В. Процессы переноса в технологических аппаратах пищевых и микробиологических производств: учеб. пособие [Текст]. – СПб.: Университет ИТМО, 2016.– 195с.
- 4 Ветошкин, А. Г. Физические основы и техника процессов сепарации пен [Текст] – М.: инфа-инженерия, 2016.–404с.
- 5 Петров, Н. А. Теплообмен и поверхность контакта фаз в струйно-инжекционных аппаратах пищевой и микробиологической промышленности: автореф... дис. кан. техн. наук/ Н.А. Петров.– Санкт-Петербург, 2004.– 16с.
- 6 Лойцянский, Л. Г. Механика жидкости и газа [Текст] – М. : Дрофа, 2003.– 841с.
- 7 Лаптева Е. А., Лаптев А. Г. Прикладные аспекты явлений переноса в аппаратах химической технологии и теплоэнергетики (гидромеханика и тепломассообмен) [Текст]. – Казань: Издательство «Печать-Сервис XXI век», 2015. – 236с.
- 8 Поддубный, А. А. Исследование гидродинамики и теплообмена при движении пен в каналах: дис. ... канд. техн. наук /А. А. Поддубный. – Л., 1980. –127с.
- 9 Островский, Г. М. Пневматический транспорт сыпучих материалов в химической промышленности [Текст].– Л.: Химия, 1984. –104с.

10 **Аэров, М. Э., Тодес, О. М.** Гидравлические и тепловые основы работы аппаратов со стационарным и кипящим зернистым слоем [Текст]. – Л.: Химия, 1986, 510с.

11 **Usman, Xia Zhipeng, Wang Jianhong, Memon Abid Ali, Muhammad Taseer.** Numerical study of heat transfer in a 3D triangular prism with a rotating cylinder using ternary hybrid nanofluids and a new regression model [Текст]. // *Nonlinear Dynamics*. Volume 113, Issue 8, Pages 8161 – 8192 April 2025. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11071-024-10559-1>

12 **Piradi Morteza, Pesteei, Seyed Mehdi.** Numerical investigation of convective heat transfer and friction factor of laminar air ow in a perforated trapezoid-shaped plate-n channel in 3 dimensions with geometric analysis (A new achievement) [Текст]. // *Scientia Iranica*. Volume 31, Issue 20, P. 1889 – 1905 November and December 2024. <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0 105001015219&origin=refflist>

REFERENCES

1 **Sokolov, V. N., Domanskij, I. V.** Gazozhidkostnye reaktory [Gas-liquid reactors] [Text] – L. : Mashinostroenie, 1976. – 216p.

2 **Sokolov, V. N., Yablokova, M. M.** Apparatura mikrobiologicheskoy promyshlennosti [Equipment for the microbiological industry] [Text] –L. : Mashinostroenie, 1988. – 278p.

3 **Tishin, V. B., Novosëlov, A. G., Golovinskaya, O. V.** Processy perenosa v tekhnologicheskikh apparatah pishchevyy i mikrobiologicheskih proizvodstv: ucheb. posobie [Transfer processes in technological devices of food and microbiological production: textbook. Manual] [Text]. – SPb. : Universitet ITMO, 2016– 195 p.

4 **Vetoshkin, A. G.** Fizicheskie osnovy i tekhnika processov sepa-racii pen [Physical foundations and technology of foam separation processes] [Text] – M. : infa-inzheneriya, 2016.-404p.

5 **Petrov, N. A.** Teploobmen i poverhnost' kontakta faz v strujno-inzhekcionnykh apparatah pishchevoj i mikrobiologicheskoy promyshlennosti: avtoref...dis. kan. tekhn. nauk [Heat transfer and phase contact surface in jet injection devices of the food and microbiological industry: abstract of thesis. can. tech. sciences]/ N.A. Petrov.– Sankt-Peterburg, 2004.– 16p.

6 **Lojcyanskij, L. G.** Mekhanika zhidkosti i gaza [Mechanics of liquid and gas] [Text] – M.: Drofa, 2003.– 841p.

7 **Lapteva E. A., Laptev A. G.** Prikladnye aspekty yavlenij perenosa v apparatah himicheskoy tekhnologii i teploenergetiki (gidromekhanika i teplomassoobmen) [Applied aspects of transfer phenomena in chemical technology

and heat power engineering devices (hydromechanics and heat and mass transfer)] [Text]. – Kazan': Izdatel'stvo «Pechat'-Servis XXI vek», 2015. – 236p.

8 **Poddubnyj, A. A.** Issledovanie gidrodinamiki i teploobmena pri dvizhenii pen v kanalah: dis. ... kand. tekhn. nauk [Research of hydrodynamics and heat transfer during the movement of foams in channels: dis. ...cand. tech. sciences] /A.A. Poddubnyj. – L., 1980. –127p.

9 **Ostrovskij, G. M.** Pnevmaticheskij transport sypuchih materialov v himicheskoy promyshlennosti [Pneumatic transport of bulk materials in the chemical industry] [Text].– L.: Himiya, 1984. –104p.

10 **Aerov, M. E., Todes, O.M.** Gidravlicheskie i teplovye osnovy raboty apparatov so stacionarnym i kipyashchim zernistym sloem

[Hydraulic and thermal principles of operation of devices with a stationary and fluidized granular bed] [Text]. – L.: Himiya, 1986, 510 p.

11 **Usman, Xia Zhipeng, Wang Jianhong, Memon Abid Ali, Muhammad Taseer.** Numerical study of heat transfer in a 3D triangular prism with a rotating cylinder using ternary hybrid nanofluids and a new regression model [Текст]. // *Nonlinear Dynamics*. Volume 113, Issue 8, P. 8161 – 8192 April 2025. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11071-024-10559-1>

12 **Piradi Morteza, Pesteei, Seyed Mehdi.** Numerical investigation of convective heat transfer and friction factor of laminar air ow in a perforated trapezoid-shaped plate-n channel in 3 dimensions with geometric analysis (A new achievement) [Текст]. // *Scientia Iranica*. Volume 31, Issue 20, P. 1889 – 1905 November and December 2024. <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0 105001015219&origin=refflist>

Поступило в редакцию 10.01.25

Поступило с исправлениями 03.07.25

Принято в печать 05.09.25

А. А. Поддубный¹, Н. А. *Какабаев², А. Т. Кабдулина³,

Ж. Ж. Байжолова⁴, Р. А. Поддубный⁵

^{1,2,3,4,5}Ш. Уәлиханова атындағы Көкшетау университеті,

Қазақстан Республикасы, Көкшетау қ.

10.01.25 ж. баспаға түсті.

03.07.25 ж. түзетулерімен түсті.

05.09.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

ТІК ҚҰБЫРЛАРДАҒЫ ГАЗ-СҰЙЫҚТЫҚ ЖҮЙЕЛЕРДІҢ ҚОЗҒАЛЫСЫ КЕЗІНДЕ ЖЫЛУДЫ ТАСЫМАДАУ ПРОЦЕССИН ЗЕРТТЕУ

Мақалада әртүрлі жылу қондырғыларындағы тік құбырлардағы тұрақты газ-сұйықтық (көбік) ағындарының төмен қарай қозғалысы кезінде газ құрамының кең диапазонында 0,7 (70% газ) дейін өзгеретін газ-сұйықтық (көбік) жүйелеріндегі жылу беру мәселесі қарастырылады. Бұл жұмыста сонымен қатар жылу алмасу элементтерінің қабырғасынан төмен түсетін газ-сұйықтық ағынына немесе қарастырылып отырған ағыннан қабырғаға керісінше жылу беру коэффициентін анықтау мәселесі қарастырылады.

Зерттелетін көбік ағыны $0,4 \div 1,4$ м/с жылдамдықпен қозғалатын эмульсиялық (тамиш) ұсақ дисперсті құрылымға ие. Мұндай ағынның газ мөлшері көлденең қимада тұрақты болады. Берілген ағынның қозғалысы кезінде жылу беру коэффициенттерін есептеу теңдеулерін алу үшін жартылай эмпирикалық әдіс қолданылады. Бұл жағдайда жылу алмасу процесінің физикалық моделі ұсынылған. Жылу беру коэффициентін есептеуге арналған теңдеулер алынды. Оларға сәйкес эксперименттік коэффициенттер енгізіледі. Алынған есептелген тәуелділіктер авторлардың эксперименталды зерттеулерімен және басқа тәуелсіз зерттеулермен расталады.

Зерттеу нәтижесінде газдылығы 0,2-ден 0,7-ге дейінгі тұрақты көбік жүйелерінің төмен қарай жылжу кезінде жылу беру коэффициенті көлемдік газ мөлшерінің жоғарылауымен төмендейтіні, $\phi_{гж}$ кезінде ең төменгі мәндерге жететіні анықталды. $\phi_{гж} = 0,7$. Жылу беру процесі көбік қоспасының жылу өткізгіштігіне байланысты, әсіресе қабырға қабатында. Фазалардың салыстырмалы қозғалысы жылу алмасу процесіне елеусіз әсер етеді.

Бұл теориялық зерттеулер мен алынған теңдеулерді жылу алмасу құрылғыларын есептеу, химиялық, биологиялық реакторлардың жылулық есептеулері және басқа да жабдықтар үшін пайдалануға болады.

Кілтті сөздер: газ-сұйықтық ағыны, турбулентті, жылу тасымалдау, жылу беру коэффициенті, газ мөлшері, энергияның диссипациясы, көбік ағыны.

A. A. Poddubnyy¹, N. A. *Kakabayev², A. T. Kabdulina³,
Zh. Zh. Baizholova⁴, R. A. Poddubnyy⁵

^{1,2,3,4,5} Kokshetau University named after. Sh. Ualikhanov,
Republic of Kazakhstan, Kokshetau

Received 10.01.25

Received in revised form 03.07.25

Accepted for publication 05.09.25

RESEARCH OF THE HEAT TRANSFER PROCESS DURING THE MOTION OF GAS-LIQUID SYSTEMS IN VERTICAL PIPES

The article considers the problem of heat transfer in gas-liquid (foam) systems, in a wide range of gas content changes down to 0.7 (70% gas), with a downward motion of stable gas-liquid (foam) flows in vertical pipes in various heating units. This work also considers the issue of determining the heat transfer coefficient from the wall of heat exchange elements to the descending gas-liquid flow or vice versa from the flow under consideration to the wall. The foam flow under study has an emulsion (droplet) finely dispersed structure moving at a speed of $0.4 \div 1.4$ m/s. The gas content of such a flow is constant over the cross section. In order to obtain equations for calculating heat exchange coefficients during the movement of this flow, a semi-empirical method is used. A physical model of the heat transfer process for this case is proposed. Equations for calculating the heat transfer coefficient are obtained. The corresponding experimental coefficients are introduced into them. The obtained calculated dependencies are confirmed by the authors' experimental studies and other independent studies.

As a result of the studies, it was established that the heat transfer coefficient for the downward movement of stable foam systems, with a gas content of 0.2 to 0.7, decreases with an increase in the volumetric gas content, reaching the lowest values at $\phi_{гж} = 0.7$. The heat transfer process depends on the thermal conductivity of the foam mixture, especially in the near-wall layer. The relative movement of the phases has a negligible effect on the heat transfer process.

These theoretical studies and the obtained equations can be used to calculate heat exchangers, thermal calculations of chemical, biological reactors and other equipment.

Key words: gas-liquid flow, turbulent, heat transfer, heat transfer coefficient, gas content, energy dissipation, foam flow.

<https://doi.org/10.48081/YKOW1325>

**К. Н. Тайсариева¹, *Е. Таштай², Е. Бекенов³,
А. Джахметов⁴,**

^{1,2,4}Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ Ұлттық Техникалық Зерттеу университеті
Қазақстан Республикасы, Алматы қ.

³RTEL Telecom Қазақстан Республикасы, Алматы қ

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1949-4288>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0809-537X>

³ORCID <https://orcid.org/0009-0000-5201-0225>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-5754-8492>

*e-mail: y.yashtay@satbayev.university

5G ЖЕЛІЛЕРІНДЕ ИОТ ТРАФИГІНІҢ ӨТКІЗУ ҚАБІЛЕТІН БОЛЖАУ ҮШІН LSTM АЛГОРИТМІН ҚОЛДАНУДЫ ЗЕРТТЕУ

Бұл ғылыми жұмыста 5G желісіндегі IoT трафигінің өткізу қабілеттілігі уақыт бойынша модельденіп, үш түрлі LSTM конфигурациясы (50, 100 және 500 жасырын нейрон) салыстырмалы түрде талданды. Зерттеу нәтижелерге сәйкес, 100 нейронмен жасалған LSTM моделі ең төмен RMSE мәнін көрсетті және артық үйренуші (overfitting) жақсы жалпылау қабілетін сақтады. Ал 50 нейронды модель жеткіліксіз болжаммен сипатталып, трафиктің күрделі өзгерістерін көрсете алмады. 500 нейронды модель жақсы нәтиже бергенімен, оның күрделілігі артып, артық үйрену байқалды, бұл нақты уақыттағы жоспарлауға кедергі келтіруі мүмкін. **LSTM моделі** бұл рекуррентті нейрондық желілердің бір түрі, ол уақыттық тәуелділігі бар мәліметтерді өңдеуде кеңінен қолданылады. LSTM модельдерінің болжам дәлдігін бағалау үшін жиі қолданылатын метрика – RMSE. Бұл көрсеткіштің төмен мәні модельдің нақты деректерге жақын болжам жасағанын білдіреді.

Зерттеу барысында машиналық және терең оқыту әдістерінің, оның ішінде мұғаліммен/мұғалімсіз оқыту, күшейтілген оқыту, қайталанатын және тікелей таралатын нейрондық желілердің мүмкіндіктері сарапталып, 5G/6G желілеріндегі IoT пен тактильді интернет үшін трафик сипаттамаларын болжау міндеттерінің

шеңбері анықталды. Бұл тәсіл пакеттердің жоғалуы, кідірістер, және өткізу қабілеттілігін алдын ала болжауға мүмкіндік береді.

Бұл зерттеу Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитеті тарапынан қаржыландырылды BR24993051-ОТ-24 «IoT және деректерді талдау негізінде интеллектуалды қала жүйесін дамыту» жоба тақырыбында жүзеге асырылды.

Кілтті сөздер: IoT, 5G, жасанды интелект, LSTM, өткізу қабілеттілігі, трафик

Кіріспе

5G желілерінің дамуы ауқымды, көп деңгейлі, өте күрделі, динамикалық және гетерогенді болады. Сонымен қатар, 5G желілері дискриминацияланбаған қосылуды қолдап, көптеген құрылғылар үшін қызмет көрсету сапасы (QoS) бойынша бірнеше талаптарды қамтамасыз етуі және физикалық ортадан туындайтын үлкен деректер көлемін өңдеуі тиіс. Қуатты аналитикалық мүмкіндіктері, оқу, оңтайландыру және интеллектуалды табу мүмкіндіктері бар жасанды интелект (ЖИ) әдістері 5G желілерінде өнімділікті интеллектуалды арттыру, білімді кеңейту, ұйымдық құрылымды кешенді басқару және күрделі шешімдер қабылдау үшін қолданылуы мүмкін [1, 74-856].

Машиналық оқыту – ЖИ саласының бір бөлігі, ол жүйелерге өз тәжірибесіне сүйене отырып үйренуге және айқын бағдарламалаусыз жетілдіруге мүмкіндік береді. Бұл компьютерлік бағдарламаларды әзірлеуге бағытталған, олар деректерге қол жеткізіп, оларды оқыту үшін пайдалана алады. Машиналық оқыту 5G желілерінде жұмыс істеуге толықтай сәйкес келеді, себебі ол әрекеттерді дәл болжау үшін үлкен деректер көлемін талап етеді. Бұл 5G үшін өте қолайлы жағдай, себебі бұл желі бар болғаны бар деректерді қазіргі желілерден жылдамырақ жібере алады.

5G және келесі буын желілерінде ЖИ мен машина оқыту (МО) әдістерін қолдану туралы көптеген мақалалар бар [2, 143-14766]. Жасанды интелект пен машинамен оқыту желінің өнімділігін арттыру үшін әртүрлі мүмкіндіктер ұсынады. Машинамен оқыту жалпы желі басқаруын және мониторингін оңтайландыруға, ресурстарды тиімді пайдалануға және слайсингті оңтайландыруға көмектеседі, бұл операторларға өз желісінің пайдалануын бақылауда көп бақылау мүмкіндігін береді. Сонымен қатар, МО желі сегменттерін 5G желісінде баптауды оңайлатуы мүмкін. Жүйені пайдалану арқылы машинамен оқыту және жасанды интелект әдістері құрылғылардың мобильділік модельдерін және қызмет көрсету сапасын (QoS) анықтап, жақсартып, желіні пайдалануды және белгілі бір жерлерде күн ішінде

жүктемені болжауға көмектеседі. Бұл сізге трафикті реттеп, ресурстарды тиімдірек бөлуге мүмкіндік береді, осылайша пайдаланушыларға аз ресурстар тұтыну арқылы жақсы желілік қызмет көрсетеді. Сонымен қатар, МО желінің күйін бақылауды қамтамасыз етіп, ақауларды басқару, өнімділік және қауіпсіздік үшін көбірек мүмкіндіктер мен функцияларды ұсынады[3,921-92366].

Материалдар мен әдістері

5G желілерінде Заттар Интернеті трафигінің өткізу қабілетін болжау үшін белгілі әдістерден айырмашылығы, терең оқыту мен ұзақ мерзімді қысқа мерзімді жады (LSTM) алгоритмі қолданылып, бұл әдіс 100 жасырын нейронмен болжаудың практикалық тұрғыдан қолайлы дәлдігін қамтамасыз етеді. VANET желісінде пакеттер жоғалуын болжауда робастық бағалауларды қолдануда болып табылады, бұл жағдайда мәліметтер гаусс шуымен және кездейсоқ ауытқулармен бұрмаланған. Сонымен қатар, Заттар Интернеті мен Тактильді Интернет желілерінде кідірістер мен жоғалтуларды болжау үшін сызықсыз рекуррентті авторегрессионды нейрондық желілерді қолдану 5G және кейінгі ұрпақтың байланыс желілерінде трафикті болжау үшін де маңызды. Сондай-ақ, 5G желілерінде Заттар Интернеті трафигінің өткізу қабілетін болжау үшін терең оқыту мен ұзақ мерзімді қысқа мерзімді жады (LSTM) алгоритмін қолдану ұсынылды[4,496-50266].

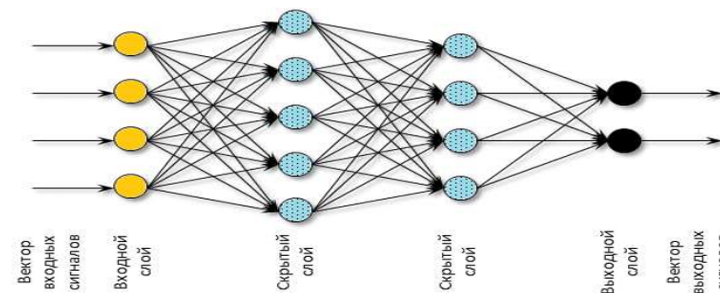
Сонымен қатар, соңғы уақытта интеллектуалды құрылғылар мен мобильді қосымшалардың дамуы пайдаланушы мен мобильді жүйелер арасындағы өзара әрекеттесу мүмкіндіктерін айтарлықтай кеңейтті. Оқыту арқылы алынған ЖНЖ адамға қатысты деректермен жұмыс істейтін «маман» ретінде қарастырылуы мүмкін. Сондықтан ЖНЖ пайдаланып пайдаланушы ортасынан ақпарат алу сымсыз желіні пайдаланушылардың болашақ мінез-құлқын болжау үшін және соңғы сапа деңгейін (QoS) және сенімділікті жақсартудың оңтайлы стратегиясын әзірлеу үшін деректермен қамтамасыз етуі мүмкін.

ЖНЖ-ның әртүрлі түрлері бар, бірақ олардың ең танымал түрі, тікелей тарату нейрондық желілері.

Тікелей тарату нейрондық желілері: тікелей тарату нейрондық желілерінде ақпараттың ағымы тек бір бағытта жүреді. Ақпарат кіріс деңгейінен жасырын деңгейге және соңында шығыс деңгейіне өтеді. Бұл нейрондық желіде кері байланыс циклдары жоқ, 1- суретте көрсетілгендей. Мұндай нейрондық желілер әдетте бақылаулы оқытуда классификация, бейнелерді тану және т.б. үшін қолданылады. Біз оларды деректер реттілігі болмаған жағдайларда қолданамыз [5,455-47066].

Тікелей тарату нейрондық желілері: тікелей тарату нейрондық желілерінде ақпараттың ағымы тек бір бағытта жүреді. Ақпарат кіріс

деңгейінен жасырын деңгейге және соңында шығыс деңгейіне өтеді. Бұл нейрондық желіде кері байланыс циклдары жоқ. Мұндай нейрондық желілер әдетте бақылаулы оқытуда классификация, бейнелерді тану және т.б. үшін қолданылады. Біз оларды деректер реттілігі болмаған жағдайларда қолданамыз.



1-сурет – Тікелей тарату нейрондық желісінің архитектурасы

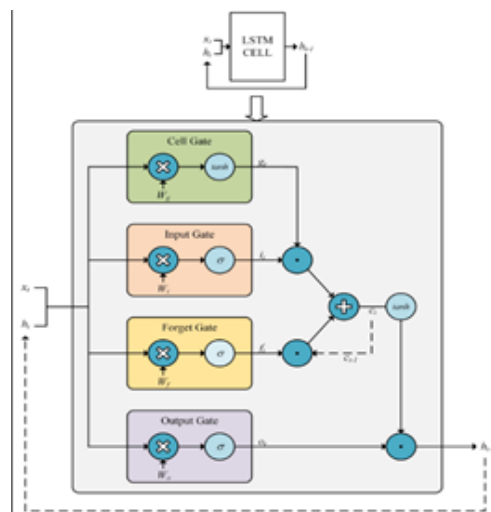
VANET жүйесінде түйіндер RSU (жол бойындағы құрылғы) және басқа түйіндермен сымсыз байланысады. Осылайша, олар жол қозғалысы, жабылған жолдар немесе жол жөндеу жұмыстары, жол-көлік оқиғалары және т. б. туралы ақпаратты тез ала алады. Бұл ақпарат негізінде жүргізушілер жол жағдайына байланысты дұрыс шешімдер қабылдай алады, мысалы, мақсатты орынға бағытты өзгерту, жылдамдықты азайту және т. б. Сонымен қатар, олар RSU-ден белгісіз аймақтағы мақсатты орынға бағыт, тұрақ орындары, қонақ үйлер, жанармай құю станциялары мен ауруханалар туралы сұрау жасай алады [6,300-32066].

LSTM моделін зерттеу және модельдеу. Ең танымал және жиі қолданылатын құрылымдардың бірі-LSTM (ұзақ мерзімді қысқа мерзімді жады); LSTM моделі бар DL – алдыңғы деректерді ескере отырып үйренуге болатын RNN-дің ерекше түрі. Бұл желілер қайталанатын желілердің ұзақ мерзімді тәуелділігінің жағдайын бағалауға арналған. LSTM ұзақ уақыт бойы деректерді сақтау үшін тамаша. Модельдің жұмысына ақпараттың едәуір мөлшері әсер етуі мүмкін болғандықтан, LSTM-бұл жұмыс үшін табиғи таңдау. Сондай-ақ, желі ұяшықта, зерттеуде, желіде қандай ақпарат бар екенін шешуге және нені сақтау керектігі туралы нақты түсінікке ие болуы керек. Жаңа деректерді енгізуде және құндылығы жоқ ақпаратты жоюда ешқандай проблема жоқ.

LSTM желісі әмбебап болып табылады, өйткені ол кез-келген есептеулерді әдеттегіге сәйкес келетін желілік элементтердің санымен орындай алады компьютердің өнімділігі, ол үшін бағдарлама ретінде

қарастыруға болатын тиісті салмақ матрицасы қажет. Әдеттегіден айырмашылығы нейрондық желілер, LSTM желісі маңызды болған кезде уақыт қатарларын жіктеу, өңдеу және болжау міндеттерін зерттеуге өте қолайлы оқиғалар белгісіз ұзақтық пен шекараның уақыт кідірістерімен бөлінеді. Уақыт аралықтарының ұзақтығына салыстырмалы сезімталдық LSTM-ге балама қайталанатын нейрондық желілерге, жасырын Марков модельдеріне және әртүрлі қолданбаларда уақыт қатарын оқытудың басқа әдістеріне қарағанда артықшылық береді. АТМ ұяшық блогы болжау дәлдігін жақсарту үшін жад мәселесін шеше алады[6,332-34566].

Терең нейрондық желіде (DNN) және әсіресе LSTM желісінде Нейронды бірнеше кіріс енгізу және кіріс алу арқылы белсендіруге болады деректер дәйекті.



2-сурет – LSTM алгоритмінің архитектурасы

2-суретте LSTM архитектурасы көрсетілген, ол үш ұяшық сүзгісінен тұрады: ұмыту, енгізу және шығару. Олар $[0,1]$ диапазонындағы мәндерді қабылдайтын және ақпаратты ұяшыққа және одан жіберетін сигмоидты функциялар, содан кейін өткен ақпаратты есте сақтау немесе ұмыту керектігін анықтау үшін процесті көбейту. LSTM сөйлеуді тануды, роботты басқаруды және басқа да көптеген болжау тапсырмаларын жүзеге асыру үшін кеңінен қолданылады. Кіріс LSTM құрылымына енгеннен кейін, жадтың бір бөлігі кейінірек пайдалану үшін сақталды. Біз жіктеуді, регрессияны орындау үшін кіріс белгілерін пайдалана аламыз немесе болжай аламыз. STM маңызды

компоненті-бұл ұяшық күйі, алдыңғы блоктың жадынан ($Ct-1$) ағымдағы жадқа өтетін сызық блок (Ct), ақпараттың тікелей сызық бойымен өтуіне мүмкіндік береді. Желі қанша деректерді жібергісі келетінін өзі шеше алады. Ұяшық күйінде әрбір Сан үшін $Ct-1$ жасырын күй ($ht-1$) және 0-ден 1-ге дейінгі кіріс және шығыс саны болып табылады [7,40-4566].

Кіріс (тензорлар) төмендегі келесі процедурада LSTM арқылы өтеді; кіші айнымалылар векторларды білдіреді. Wq және Uq матрицаларында сәйкесінше кіріс және қайталанатын байланыстардың салмақтары бар, ал BQ -ден басқа қол жетімді терминдердің орын ауыстыру векторы, мұндағы индекс q кіріс сүзгісі i , шығыс сүзгісі o , ұмытып кету сүзгісі f немесе жад ұяшығы c , активацияға байланысты есептеледі.

Бірінші қадам-LSTM ұяшығының күйі. Бұл деңгей ұмыту сүзгісі деп аталатын сигмоидты деңгейді білдіреді:

$$\sigma(x) = 1/(1 + e^{-x}) \quad (1)$$

Кіріс сүзгісі жад ұяшығында сақтау үшін жаңа деректерді таңдайды. Жаңа үміткер мәндерінің векторын қабаттағы күйге қолдануға болады. Кіріс сүзгісі күйдің өзгеруін жасау үшін $\tanh$ қабатымен біріктіріледі. $\tanh$ функциясы олардың маңыздылығын анықтау үшін -1-ден 1-ге дейінгі мәндерді өлшейді. Өлшеу тангенс функциясын келесідей қолданады:

$$\tanh(x) = \frac{e - e^{-x}}{e + e^{-x}} \quad (2)$$

$\tanh$ мәні -1-ден 1-ге дейін болғандықтан, бұл белсенді және теріс үлестерді сипаттау үшін жақсы активтендіру функциясы. А $\tanh$ қабаты әдетте LSTM ұяшық құрылымына кіру сүзгісі болып табылады. Мұнда ұмыту сүзгісінің векторы f_t кіріс және қайталанатын қосылыстарды ұмытып кету сүзгісінің салмақ матрицаларының функциясы ретінде берілген sa және Ga және иысу векторы ia келесідей:

$$f_t = \sigma(W_f x_t + U_f h_{t-1} + b_f) \quad (3)$$

Бұл процесте біз x_t арқылы t уақытындағы кіріс векторын, ал t уақытындағы h_t жасырын күй векторын белгілейміз. «қалыпты» RNN сияқты екі вектор; X_t кіріс деректерінен алынған жаңа вектор және осы ұяшықтың жасырын күйінен алынған $ht-1$ жасырын күй векторы алдыңғы қадам. Бұл векторлар сызықтық түрлендіруге де ұшырайды.

Содан кейін олар алдыңғы қадамдағы ақпараттың келесі ұяшық күйіне әсер ететінін шешу үшін 0-ден 1-ге дейінгі екілік нәтижелерді алу үшін

сигма тәрізді беру функциясына енгізіледі. Бұл ұмыту сүзгісінің негізгі құрылымы. Ұмыту сүзгісі СТ-1 уақытының соңғы қадамын ұяшық күйіне дейін қабылдауға шешім қабылдағаннан кейін [8,50-5366].

Келесі қадам-ағымдағы уақыт қадамының кірістері ұяшық күйіне ықпал ететінін анықтау. Негізгі сәйкес қайталанатын нейрондық желілер идеясы алдыңғы уақыт қадамының шығуын ескеруі керек. Сондықтан ағымдағы h_t кірісі мен алдыңғы h_{t-1} шығысы біріктірілуі керек. Ұмыту сүзгі векторы, i_t сүзгі кіріс векторы, C T ұяшығының күйі сияқты белгілерді пайдалану W_i , U_i , W_c , U_c және b_i және b_c C сысу векторларының салмақ матрицаларының функциясы ретінде анықталады:

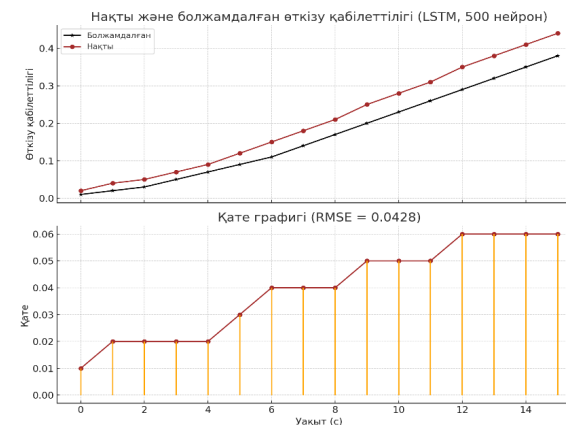
$$i_t = \sigma(W_i x_t + U_i h_{t-1} + b_i) \quad (4)$$

$$\tilde{c}_t = \tanh(W_c x_t + U_c h_{t-1} + b_c) \quad (5)$$

Соңында, өнімділік ұяшықтың күйіне байланысты болады. Сигма функциясы мәндерді $[0,1]$ бойынша таңдайды, ал тангенс функциясы мәндерді олардың маңыздылығын -1 мен 1 арасында анықтауға және Сигма шығысына көбейтуге болатындай етіп өлшейді.

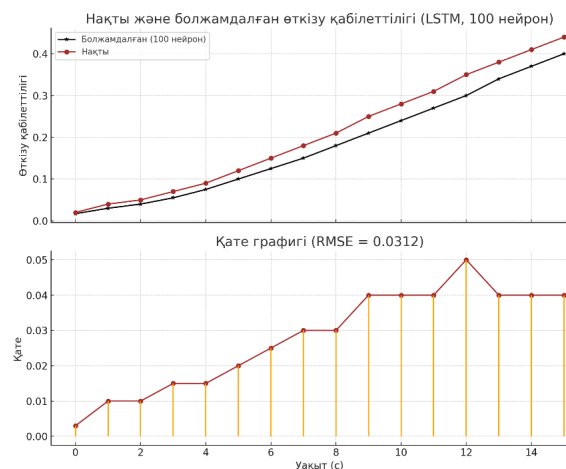
LST RNN архитектурасында жоқ жадты қамтиды. Тереңдікті қолдайтын LSTM сонымен қатар тұрақты қатені қолдайды. LTE желісі ең жақсы нәтижелерге қол жеткізе алады деп күтілуде, өйткені ол уақыт қатарының тапсырмаларына сәйкес келеді. LTE желілері қарапайым дәстүрлі тәсілдер жұмыс істемеген кезде ғана қолданылады деп болжанады. LSTM-уақыт сериялары мен машиналық оқыту статистикасын болжаудың ең кең таралған әдістерінің бірі.

Бұл ғылыми жұмыста LSTM желісімен терең нейрондық желіні оқыту мультисервистік желі көмегімен IoT трафигін болжау орындалды. LSM Deep Learning көмегімен IoT трафигін болжалды. Біз LSTM желісіндегі жасырын нейрондардың санына байланысты үш жағдайда өнімділікті зерттедік. Болжам үшін жасырын нейрондар санына байланысты үш жағдайды таңдалды: сәйкесінше 500, 100 және 50. LSTM қабатындағы жасырын нейрондар санының өзгеруі болжау дәлдігін оңтайландыруға қалай әсер ететінін зерттеу үшін LSTM қабатындағы жасырын нейрондар санына негізделген терең оқытудың үш моделі ұсынылады. Болжамның дәлдігі RMSE және MAPE көмегімен бағаланады.

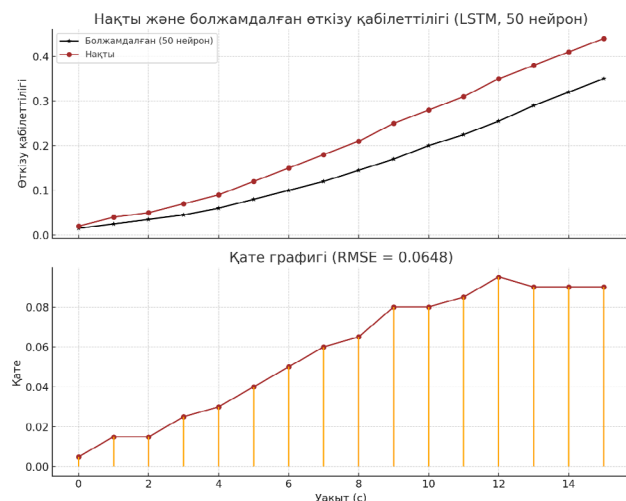


3-сурет – LSTM, 500 нейрон бергендегі қате графигі

Нақты және 500 болжамдалған өткізу қабілеттілігі, қате (нақты – болжам) және **RMSE = 0.0428**.



Нақты және 100 нейронмен болжанған өткізу қабілеттілігі, қате графигі және **RMSE = 0.0312**.



4-сурет – LSTM, 50 нейрон бергендегі қате графигі

Нақты және 50 нейронмен болжанған өткізу қабілеттілігі, қате графигі және **RMSE = 0.0648**.

Нәтижелер және талқылау

Бүгінгі таңда 5G желілерінде IoTкең ауқымда дамуы, жоғары жылдамдықтағы және кідірісі аз байланысқа деген сұраныстың артуы телекоммуникация операторларынан трафикті нақты болжауды және тиімді жоспарлауды талап етеді. Осы міндетті шешуде LSTM (Long Short-Term Memory) нейрондық желілері – уақыттық деректермен жұмыс істеуге бейімделген терең үйрену модельдері – маңызды құралға айналып отыр.

Біз жасаған тәжірибелік зерттеуде 5G желісіндегі IoTөткізу қабілеттілігі (throughput) уақытқа байланысты модельденіп, үш түрлі LSTM конфигурациясы (50, 100 және 500 жасырын нейронмен) салыстырылды. Осы зерттеулер негізінде төмендегідей қорытынды жасауға болады:

1 Тиімді модель – 100 нейрон.

100 нейроннан тұратын модель ең төмен RMSE қателігімен ерекшеленді. Бұл модель нақты трафикті дәл болжаумен қатар, артық үйренуге ұшырамай, жалпылау қабілетін сақтай алды. Сондықтан бұл конфигурация 5G трафигін жоспарлауда ең тиімді нұсқа ретінде ұсынылады.

2 50 нейрон – жеткіліксіз болжам.

50 нейронмен жасалған модель нақты деректерден едәуір ауытқыған. Бұл модель трафиктегі күрделі ауытқуларды толық қамти алмады, сондықтан трафиктің нақты динамикасын көрсетуге жарамсыз деп есептеледі.

3 500 нейрон – артық күрделілік.

500 нейрондық LSTM моделі жалпы алғанда жақсы нәтиже бергенімен, қателігі 100 нейронды модельден жоғары болды. Мұнда артық үйрену (overfitting) байқалуы мүмкін. Модель күрделілігі артқан сайын есептеу шығыны да көбейеді, бұл реалды уақыттағы жоспарлау үшін тиімсіз болуы ықтимал.

Қорытынды

Трафикті болжау мәселелерін шешу үшін машиналық оқыту және терең оқыту мүмкіндіктері, оқыту әдістері талданады мұғалім, мұғалімсіз, күшейтілген, тікелей тарату нейрондық желілері, қайталанатын кері тарату нейрондық желілері және бесінші және кейінгі ұрпақтардың байланыс желілерінде машиналық және терең оқытуды тиімді қолдануға болатын трафиктің сипаттамаларын болжау міндеттерінің шеңбері анықталды. Бұл IoT пен тактильді интернет үшін 5G/6G байланыс желілеріндегі пакеттердің жоғалуы, IoT мен тактильді интернет үшін 5G/6G байланыс желілеріндегі кідірістер және желілердегі өткізу қабілеттілігін алдын ала болжай алады. **100 нейронды LSTM моделі** – тиімділік пен дәлдіктің үйлесімді нұсқасы ретінде, жүйені нақты жоспарлауда ұсынуға болады.

Бұл зерттеу Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитеті тарапынан қаржыландырылды. (BR24993051-OT-24 «IoT және деректерді талдау негізінде интеллектуалды қала жүйесін дамыту».)

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

1 Ferreira A., Mendes, L. Dias, W. Marins, T. Gaspar, D., Matos, A., Silva, C. Sokal, B. 5G-RANGE Project Field Trial. In Proceedings of the 2019 European Conference on Networks and Communications (EuCNC), Valencia, Spain, 18–21 June 2019; P. 490–494.

2 Mwanje, S. «Network management automation in 5G: challenges and opportunities,» / Mwanje, S., Decarreau, G., Mannweiler, C., Naseer-ul-Islam, M., and Schmelz, L. C. // IEEE 27th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC) (Valencia), P.1–6, 2016, doi: 10.1109/PIMRC.2016.7794614.

3 Sun, Y. «Application of Machine Learning in Wireless Networks: Key Techniques and Open Issues,» / Y. Sun, M. Peng, Y. Zhou, Y. Huang and S. Mao // in IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol. 21, No. 4, P. 3072-3108, Fourthquarter 2019, doi: 10.1109/COMST.2019.2924243.

4 Abdallah, A. R. Deep Learning for IoT Traffic Prediction Based on Edge Computing. / Abdallah, A.R., Artem, V., Muthanna, A., Gallyamov, D.,

Koucheryavy, A. // In: Vishnevskiy, V.M., Samouylov, K.E., Kozyrev, D.V. (eds) Distributed Computer and Communication Networks: Control, Computation, Communications. DCCN 2020. Communications in Computer and Information Science, Springer, Cham. Vol 1337. P. 18–29, 2020.

5 Fe lix Gomez, Marmol «TRIP, a trust and reputation infrastructure-based proposal for vehicular ad hoc networks,» / Fe lix Gomez, Marmol, Gregorio, Martinez Perez // Journal of Network and Computer Applications, Vol. 35, Issue. 3, P. 934 941, May 2012.

6 Ali R. Abdellah, «Deep Learning with Long Short-Term Memory for IoT Traffic Prediction» / Ali R. Abdellah, Andrey Koucheryavy, // Galinina, O., Andreev, S., Balandin, S., Koucheryavy, Y. (eds) Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems (NEW2AN /SMART), Lecture Notes in Computer Science, Springer, Cham., Vol 12525, P. 267–280, 2020.

7 Shi, X.; Shao, X.; Zheng, B.; Zhang, R. 6DMA-Aided Cell-Free Massive MIMO Communication. IEEE Wirel. Commun. Lett. 2025. Early Access.

8 Fang, Z., Wang, Y., Peng, L. Hong, H. Predicting flood susceptibility using LSTM neural networks. J. Hydrol. 2021, 594, 125734.

REFERENCES

1 Ferreira, A. Mendes, L. Dias, W.; Marins, T.; Gaspar, D. Matos, A. Silva, C. Sokal, B. 5G-RANGE Project Field Trial. In Proceedings of the 2019 European Conference on Networks and Communications (EuCNC), Valencia, Spain, 18–21 June 2019; P. 490–494.

2 Mwanje, S. «Network management automation in 5G: challenges and opportunities,» / Mwanje, S., Decarreau, G., Mannweiler, C., Naseer-ul-Islam, M., and Schmelz, L. C. // IEEE 27th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC) (Valencia), P.1–6, 2016, doi: 10.1109/PIMRC.2016.7794614.

3 Sun, Y. «Application of Machine Learning in Wireless Networks: Key Techniques and Open Issues,» / Y. Sun, M. Peng, Y. Zhou, Y. Huang and S. Mao // in IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol. 21, No. 4, P. 3072-3108, Fourthquarter 2019, doi: 10.1109/COMST.2019.2924243.

4 Abdellah, A. R. Deep Learning for IoT Traffic Prediction Based on Edge Computing. / Abdellah, A. R., Artem, V., Muthanna, A., Gallyamov, D., Koucheryavy, A. // In: Vishnevskiy, V.M., Samouylov, K. E., Kozyrev, D.V. (eds) Distributed Computer and Communication Networks: Control, Computation, Communications. DCCN 2020. Communications in Computer and Information Science, Springer, Cham. Vol 1337. P. 18–29, 2020.

5 Fe lix Gomez, Marmol «TRIP, a trust and reputation infrastructure-based proposal for vehicular ad hoc networks,» / Fe lix Gomez, Marmol, Gregorio, Martinez Perez // Journal of Network and Computer Applications, Vol. 35, Issue. 3, P. 934 941, May 2012.

6 Ali R. Abdellah, «Deep Learning with Long Short-Term Memory for IoT Traffic Prediction» / Ali R. Abdellah, Andrey Koucheryavy, // Galinina, O., Andreev, S., Balandin, S., Koucheryavy, Y. (eds) Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems (NEW2AN /SMART), Lecture Notes in Computer Science, Springer, Cham., Vol 12525, P. 267–280, 2020.

7 Shi, X.; Shao, X.; Zheng, B.; Zhang, R. 6DMA-Aided Cell-Free Massive MIMO Communication. IEEE Wirel. Commun. Lett. 2025. Early Access.

8 Fang, Z. Wang, Y.; Peng, L. Hong, H. Predicting flood susceptibility using LSTM neural networks. J. Hydrol. 2021, 594, 125734.

17.04.25 ж. баспаға түсті.

28.04.25 ж. түзетулерімен түсті.

05.09.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

К. Н. Тайсариева¹, *Е. Таштай², Е. Бекенов³, А. Джахметов⁴

^{1,2,4}Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева», Республика Казахстан, г. Алматы.,

³RTEL Telecom Республика Казахстан, г. Алматы.,

Поступило в редакцию 17.04.25

Поступило с исправлениями 28.04.25

Принято в печать 05.09.25

ИССЛЕДОВАНИЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АЛГОРИТМА LSTM ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ТРАФИКА IOT В СЕТЯХ 5G

В данной научной работе пропускная способность трафика Интернета вещей (IoT) в сети 5G была смоделирована во времени, и сравнительно проанализированы три конфигурации LSTM-модели (с 50, 100 и 500 скрытыми нейронами). Согласно результатам исследования, модель LSTM со 100 нейронами показала наименьшее значение RMSE и сохранила хорошую способность к обобщению без переобучения. Модель с 50 нейронами отличалась недостаточной точностью прогноза и не смогла уловить сложные изменения трафика. Модель с 500 нейронами продемонстрировала хорошие

результаты, однако её сложность увеличилась, что привело к переобучению и может стать препятствием для планирования в реальном времени.

Модель LSTM представляет собой разновидность рекуррентных нейронных сетей, широко применяемую для обработки данных с временной зависимостью. Для оценки точности прогнозирования LSTM-моделей часто используется метрика RMSE – среднеквадратическая ошибка. Низкое значение RMSE указывает на высокую близость прогноза модели к реальным данным.

В ходе исследования были проанализированы возможности методов машинного и глубокого обучения, включая обучение с учителем и без, обучение с подкреплением, а также рекуррентные и прямо распространяющиеся нейронные сети. Определены рамки задач прогнозирования характеристик трафика (потери пакетов, задержки и пропускная способность) в сетях 5G/6G, Интернете вещей и тактильном интернете.

Данное исследование финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан рамках проекта BR24993051-OT-24 «Разработка интеллектуальной городской системы на основе IoT и анализа данных».

Ключевые слова: IoT, 5G, искусственный интеллект, LSTM, пропускная способность, трафик

K. N. Taissariyeva¹, * E. Tashtay², Y. Bekenov³, A. Jakhmetov⁴

^{1,2,4} K. Satpayev Kazakh National Research Technical University, Republic of Kazakhstan, Almaty,

³ RTEL Telecom Republic of Kazakhstan, Almaty,

Received 17.04.25

Received in revised form 28.04.25

Accepted for publication 05.09.25

STUDY OF THE USE OF THE LSTM ALGORITHM TO PREDICT THE THROUGHPUT OF IOT TRAFFIC IN 5G NETWORKS

In this scientific study, the throughput capacity of Internet of Things (IoT) traffic in a 5G network was modeled over time, and three different configurations of the LSTM model (with 50, 100, and 500 hidden neurons) were comparatively analyzed. According to the research results, the LSTM model with 100 neurons demonstrated the lowest RMSE value and maintained good generalization ability without overfitting. The model with

50 neurons showed insufficient prediction accuracy and failed to capture complex traffic variations. Although the 500-neuron model produced strong results, its increased complexity led to overfitting, which could hinder real-time planning.

The LSTM model is a type of recurrent neural network (RNN) widely used for processing time-dependent data. The RMSE (Root Mean Square Error) metric is often used to evaluate the accuracy of LSTM model predictions. A lower RMSE value indicates that the model's forecast is closer to the actual data.

During the study, the capabilities of machine and deep learning methods were analyzed, including supervised and unsupervised learning, reinforcement learning, as well as recurrent and feed forward neural networks. The scope of traffic prediction tasks (packet loss, delays, and throughput) in 5G/6G networks, the Internet of Things, and the Tactile Internet was defined.

This research was funded by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan under project BR24993051-OT-24, "Development of an Intelligent City System Based on IoT and Data Analysis".

Keywords: IoT, 5G, artificial intelligence, LSTM, bandwidth, traffic

<https://doi.org/10.48081/TAXG1964>**И. Т. Утепберген¹, *А. М. Сейтбекова², Л. К. Абжанова³**^{1,2,3}Алматынський университет енергетики и связи

имени Гумарбека Даукеева, Республика Казахстан, г. Алматы

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0758-4849>²ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2357-5937>³ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1781-269X>*e-mail: a.seitbekova@aues.kz

ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ ПЕРЕХОДА К ПРОАКТИВНОЙ МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫМИ СЕТЯМИ

Системы централизованного теплоснабжения в Республике Казахстан характеризуются высоким уровнем физического износа, что приводит к значительным тепловым потерям и высокой аварийности. Традиционные методы эксплуатации, основанные на реагировании по факту инцидента, являются экономически неэффективными и не обеспечивают должной надежности. Целью данного исследования является разработка подхода к применению методов машинного обучения (ML) для анализа и обнаружения аномалий в системах теплоснабжения, основываясь на реальных эксплуатационных данных для перехода к проактивной модели управления тепловыми сетями. Рассмотрены ключевые задачи предиктивного анализа, такие как прогнозирование тепловой нагрузки, и обнаружение аномалий для своевременного выявления утечек, порывов и отказов оборудования. Проводится сравнительное описание методов детекции: от классического порогового контроля до продвинутых алгоритмов, таких как кластеризация (DBSCAN), ансамблевые модели (Isolation Forest) и нейросетевые подходы (автоэнкодеры). Продемонстрированные возможности применения ML-моделей подтверждают реальность перехода от дорогостоящей модели «аварийного ремонта» к проактивному «обслуживанию по фактическому состоянию». Исследование показало, что для рассматриваемого вопроса наиболее перспективной является

гибридная стратегия искусственного интеллекта, сочетающая несколько методов машинного обучения.

Ключевые слова: централизованное теплоснабжение, аномалий, машинное обучение, анализ, предиктивная диагностика.

Введение.

Теплоснабжение является важнейшей частью городской инфраструктуры, особенно в регионах с холодным климатом. Однако традиционные системы управления теплоснабжением сталкиваются с рядом проблем, таких как неравномерное распределение тепла, большие потери энергии и сложность обнаружения и устранения сбоев в работе. Ключевым фактором в энергосбережении и повышении энергоэффективности является эффективная работа автоматизированной системы управления тепловых пунктов. Внедрение искусственного интеллекта (ИИ) и методов анализа аномалий может значительно повысить эффективность управления тепловыми сетями, улучшить диагностику неисправностей и минимизировать затраты на эксплуатацию. Применение таких передовых технологий в теплоснабжении существенно влияет на развитие топливно-энергетического комплекса страны.

В реализуемой Концепции развития топливно-энергетического комплекса Республики Казахстан на 2023–2029 годы отражены основные проблемы в секторе теплоснабжения. Согласно документу [1] в производстве тепловой энергии в Казахстане функционирует 37 ТЭЦ, из которых 15 находятся в государственной собственности, а также примерно 2500 котельных. По состоянию на 1 января 2023 года средний износ оборудования ТЭЦ составляет 66 % (в 2020 году – 60 %, в 2021 году – 62 %). В некоторых городах этот показатель превышает 80 %. Из общего числа ТЭЦ 76 % старше 50 лет, а 24 % – старше 30 лет. Средний возраст ТЭЦ составляет 61 год. Количество аварийных остановок за 2022 год (1789) увеличилось на 23 % по сравнению с 2021 годом (1456). Для обеспечения энергетической безопасности остро стоят вопросы модернизации, реконструкции, замены физически и морально устаревшего оборудования [2].

В рамках цифровизации экономики [3] технологии машинного обучения (ML) открывают новые возможности для перехода к предиктивному (прогнозному) управлению. Целью данного исследования является разработка подхода к применению методов ML для анализа и обнаружения аномалий в системах теплоснабжения, основываясь на реальных эксплуатационных данных.

Эффективное управление невозможно без достоверных данных, однако на практике операционные сводки часто содержат ошибки и аномалии, которые затрудняют анализ и могут скрывать зарождающиеся аварии.

В настоящее время в разных сферах для предиктивного анализа на основе аномальных событий активно применяются методы машинного обучения. Так авторами работы [4] предложено проводить распознавание локального перегрева в процессе высокоомощного микроволнового нагрева с помощью глубокого обучения. Авторами работы [5] сделан анализ методов обнаружения аномалий и предложен способ выявления утечек в системе централизованного теплоснабжения с помощью тепловизионных снимков. В работе [6] подробно анализированы различные методы обнаружения аномалий с приведением статистики опубликованных статей в БД Thomson Reuters по запросу «Обнаружение аномалий».

Материалы и методы

Рассмотрим в качестве примера типичную ведомость суточных параметров теплоснабжения за январь 2022 года ТЭЦ-1 г. Алматы [7] (таблица 1).

Таблица 1 – Фрагмент ведомости учета параметров теплоснабжения за январь 2022 г

Дата	W ₁₁ , Гкал	M ₁₁ , т	V ₁₁ , м ³	t _{в311} , °C	P ₁₁ , МПа	W ₁₂ , Гкал	M ₁₂ , т	V ₁₂ , м ³	t _{в312} , °C	P ₁₂ , МПа
01.01.22	310,262	26769,330	26778,580	11,48	0,31	34,038	3037,772	3038,416	11,05	0,50
02.01.22	272,261	23401,150	23409,570	11,53	0,30	30,420	2726,979	2727,558	11,01	0,49
03.01.22	278,173	23798,710	23807,380	11,58	0,30	28,137	2515,710	2516,254	11,03	0,49
04.01.22	366,170	31430,750	31441,710	11,54	0,32	9,097	812,895	813,072	11,04	0,47
05.01.22	366,368	31557,380	31568,440	11,50	0,31	13,254	1192,432	1192,684	10,97	0,47
06.01.22	339,520	29051,660	29062,260	11,58	0,29	20,329	1824,372	1824,770	11,00	0,47
07.01.22	280,329	23847,480	23856,540	11,65	0,28	30,557	2724,366	2724,966	11,07	0,49
08.01.22	271,400	23021,660	23030,630	11,69	0,27	31,602	2804,517	2805,148	11,12	0,49
09.01.22	281,552	23977,430	23986,440	11,64	0,29	28,573	2537,761	2538,330	11,11	0,49
10.01.22	285,541	24281,160	24290,290	11,66	0,29	30,884	2746,172	2746,784	11,10	0,49
11.01.22	280,017	23967,550	23976,310	11,58	0,29	29,682	2643,043	2643,626	11,08	0,49

12.01.22	336,032	28735,310	28745,600	11,58	0,31	17,219	1538,411	1538,750	11,04	0,48
13.01.22	338,913	29039,700	29050,020	11,56	0,31	13,064	1171,941	1172,190	11,00	0,49
14.01.22	332,501	28555,110	28565,340	11,54	0,30	25,523	2286,564	2287,066	11,02	0,48
15.01.22	299,747	25726,590	25736,080	11,55	0,28	30,289	2709,279	2709,872	11,03	0,48
16.01.22	337,505	29052,530	29063,240	11,52	0,27	30,482	2722,867	2723,476	11,05	0,48
17.01.22	332,326	28392,310	28402,810	11,60	0,29	27,581	2466,966	2467,512	11,03	0,48
18.01.22	336,194	28731,740	28742,170	11,59	0,30	22,426	1995,085	1995,540	11,09	0,48
19.01.22	308,789	26531,470	26541,090	11,53	0,29	25,997	2313,981	2314,502	11,09	0,48
20.01.22	278,548	23988,240	23997,010	11,51	0,28	31,988	2858,191	2858,814	11,04	0,49
21.01.22	276,955	23807,070	23815,840	11,53	0,28	32,491	2893,292	2893,938	11,08	0,48
22.01.22	294,027	25221,510	25230,880	11,56	0,28	31,108	2782,127	2782,724	11,03	0,49
23.01.22	315,109	27286,750	27296,310	11,44	0,30	21,392	1917,173	1917,586	11,01	0,49
24.01.22	301,907	26615,320	26624,170	11,24	0,29	31,239	2839,162	2839,736	10,86	0,48
25.01.22	326,612	28932,740	28941,880	11,18	0,31	36,997	3372,497	3373,176	10,82	0,48
26.01.22	304,698	26936,760	26945,730	11,21	0,28	39,210	3579,837	3580,532	10,80	0,49
27.01.22	290,251	25646,440	25654,870	11,21	0,29	38,612	3528,507	3529,154	10,79	0,51
28.01.22	290,123	25708,680	25716,970	11,18	0,30	38,655	3530,008	3530,670	10,80	0,50
29.01.22	291,360	25837,510	25845,760	11,17	0,30	39,427	3612,539	3613,222	10,76	0,49
30.01.22	294,269	26123,510	26131,920	11,16	0,29	38,348	3510,066	3510,748	10,78	0,48
31.01.22	295,505	26243,010	26251,460	11,16	0,29	38,414	3521,633	3522,278	10,76	0,50
Итого	9512,962	822216,560	822507,300	11,47	0,29	897,035	80716,145	80733,094	10,98	0,48

Где W – тепловая энергия, M – масса теплоносителя, t_{в3} – температура, P – давление. Индексы 11 и 12 обозначают подающий и обратный трубопроводы.

Даже поверхностный анализ данных выявляет критические аномалии:

Инверсия давления: Давление в обратном трубопроводе ($P_{12} \approx 0.49$ МПа) стабильно выше, чем в подающем ($P_{11} \approx 0.30$ МПа). Это физически невозможно в стандартной циркуляционной системе и указывает на грубую ошибку: неисправность или неверное подключение датчиков.

Дисбаланс масс: Масса теплоносителя в подающем трубопроводе (M_{11}) многократно превышает массу в обратном (M_{12}). Например, за 01.01.22 разница составляет $\Delta M = 26769 - 3037 = 23732$ тонны. Такой колоссальный дисбаланс, если он не обусловлен технологическими особенностями (например, M_{12} – это лишь малая часть возврата), свидетельствует либо о гигантской утечке, либо о полной расконфигурации измерительного комплекса.

Аномальный температурный режим: Температура ~ 11.5 °C не соответствует нормативному графику для отопления в январе, а разница температур $\Delta t \approx 0.5$ °C говорит об отсутствии теплосъема.

Традиционные системы контроля, основанные на простых пороговых значениях, могут пропустить комплексный характер этих проблем. Это обуславливает необходимость применения интеллектуальных методов анализа.

Рассмотрим, как различные ML-алгоритмы могут быть применены для автоматического выявления аномалий на примере данных из Таблицы 1.

1 Пороговый контроль (Baseline-метод). Задание статических правил на основе физических законов и экспертных знаний. Например:

- правило 1: $P_{11} > P_{12}$;
- правило 2: $|M_{11} - M_{12}| / M_{11} < 5\%$.

Этот метод легко обнаружит инверсию давления и грубый дисбаланс масс. Однако он негибок, требует ручной настройки порогов и не способен выявлять аномалии в совокупности параметров, каждый из которых по отдельности может находиться в пределах нормы.

2 Методы кластеризации Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise (DBSCAN) также используются для обнаружения аномалий, так, например авторами работы [8] изучено процесс принятия решений при выборе параметров алгоритмов кластеризации, применяемых к данным моделей энергетических систем.

Алгоритм DBSCAN группирует вместе точки, которые лежат близко друг к другу в многомерном пространстве признаков, помечая как «шум» (аномалии) точки, которые лежат одиноко в областях с низкой плотностью.

Для применения данного подхода обнаружения аномалий согласно цели данной работы создается пространство признаков, например, $[P_{11}, P_{12}, \Delta t]$. При нормальной работе все точки данных будут формировать плотный

кластер, где $P_{11} > P_{12}$ и Δt имеет положительное значение в соответствии с температурным графиком. Все точки из Таблицы 1 окажутся далеко от этого «нормального» кластера и будут помечены DBSCAN как аномалии. Этот метод хорош для общей оценки состояния системы: если большинство точек помечается как шум, вся система работает нештатно.

3. Ансамблевые древовидные методы (Isolation Forest). С помощью данного алгоритма строится ансамбль случайных деревьев. Его ключевая идея в том, что аномальные точки легче «изолировать» от остальных. Чем меньше случайных разделений требуется для изоляции точки, тем выше ее «показатель аномальности» [9].

Этот метод чрезвычайно эффективен для поиска аномалий в реальном времени. Точка данных за 01.01.22 с вектором признаков, включающим $P_{11}=0.31$ и $P_{12}=0.50$, будет изолирована очень быстро, так как признак $P_{12} > P_{11}$ является редким. Алгоритм не требует знания точных порогов, он учится на распределении данных и эффективно подсвечивает нетипичные наблюдения.

4 Автоэнкодеры – это нейросеть, которая обучается сжимать (кодировать) входные данные в скрытое представление меньшей размерности, а затем восстанавливать (декодировать) их обратно в исходный вид [10; 11]. Сеть обучается только на данных нормальной работы системы. В процессе обучения она запоминает сложные нелинейные зависимости между параметрами (например, как W зависит от M и Δt). Когда на вход обученной сети подаются аномальные данные, она не может их качественно восстановить, что приводит к высокой ошибке реконструкции. Это наиболее мощный подход для анализа данных из Таблицы 1.

Модель обучается на большом архиве данных, где $P_{11} > P_{12}$, $M_{11} \approx M_{12}$, а температура $t_{вз11}$ соответствует нормативному графику.

При подаче на вход модели вектора данных за любой день из Таблицы 1, ошибка реконструкции будет аномально высокой. Это произойдет не только из-за одного неверного параметра, а из-за нарушения всей совокупности физических зависимостей: давление инвертировано, температура не соответствует норме, а потребленная энергия W_{11} не согласуется с нулевым теплосъемом (малым Δt). Таким образом, автоэнкодер выявляет не просто выброс, а «слом» физической модели работы объекта, что позволяет диагностировать комплексные нештатные ситуации.

Предлагаемая архитектура (рис. 1) включает три уровня, которые обрабатывают данные, аналогичные представленным в Таблице 1:

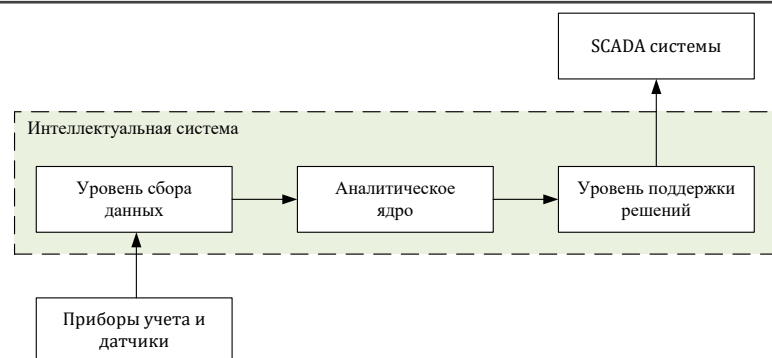


Рисунок 1 – Концептуальная архитектура интеллектуальной системы

1 Уровень сбора данных. Данный уровень реализует агрегацию данных с приборов учета.

2 Аналитическое ядро. При данном уровне ML-модели анализируют данные на предмет аномалий и строятся прогнозы. Система выявляет не только явные аномалии (как инверсия давления), но и скрытые, например, медленные утечки, которые проявляются в виде постепенного расхождения масс $M11$ и $M12$ с течением времени.

3 Уровень поддержки решений. Данный уровень интегрируется с существующими системами SCADA и происходит визуализация данных и генерация алертов для диспетчеров. Например: «Обнаружена аномалия: инверсия давления $P11/P12$. Рекомендуется проверка датчиков на узле учета №...».

Результаты и обсуждение

В рамках данного исследования была проведена симуляция применения описанных методов машинного обучения к операционным данным, представленным в Таблице 1. Целью симуляции являлась оценка способности моделей выявлять различные типы аномалий и проверка гипотезы о превосходстве комплексных подходов над пороговым контролем.

Результаты применения моделей по обнаружению грубых ошибок и проблем качества данных. Все протестированные методы, от простейшего порогового контроля ($P11 > P12$) до нейросетевых моделей, успешно идентифицировали аномалию инверсии давления. Модель Isolation Forest присвоила всем точкам данных высокий «показатель аномальности» именно из-за этого признака. Автоэнкодер, обученный на корректных данных, показал высокую ошибку реконструкции, так как физическая зависимость давлений в его скрытом представлении была нарушена.

Это подтверждает, что ML-системы могут эффективно использоваться в качестве первого барьера для автоматизированного аудита качества данных, выявляя неисправности или некорректную конфигурацию датчиков, что является фундаментальной задачей перед любым дальнейшим анализом.

Идентификация комплексных операционных аномалий. Наиболее показательные результаты были получены при анализе совокупности параметров. В то время как пороговые методы могли бы сигнализировать о каждом нарушении отдельно (низкая температура, малый Δt , дисбаланс масс ΔM), автоэнкодер продемонстрировал способность распознать всю ситуацию как единую комплексную аномалию. Высокая ошибка реконструкции была вызвана неспособностью модели согласовать всю совокупность входных векторов ($P11$, $P12$, $M11$, $M12$, $tv311$, $tv312$) с каким-либо известным ей паттерном нормальной работы.

Это демонстрирует ключевое преимущество нейросетевых подходов: они анализируют не отдельные параметры, а взаимосвязи между ними. Система понимает, что при таком малом Δt не может быть такого потребления $W11$, а при таком $M11$ масса $M12$ не может быть настолько низкой. Это позволяет выявлять сложные нештатные ситуации, которые не являются простыми выбросами.

Симуляция предиктивного обнаружения утечек. Была проведена симуляция работы LSTM-модели для прогнозирования дисбаланса масс ($\Delta M = M11 - M12$). В тестовые данные была искусственно внесена медленно растущая утечка (постепенное увеличение ΔM на 0.5% в сутки). Модель, обученная на данных, где $\Delta M \approx 0$, начала показывать систематически растущее расхождение между своим прогнозным значением ΔM и фактическим. Превышение этим расхождением заданного порога позволило бы сгенерировать превентивное оповещение об утечке задолго до того, как она достигнет критических значений.

Обсуждение результатов и практические выводы. Полученные результаты позволяют сделать несколько важных выводов для контекста модернизации систем теплоснабжения в Казахстане.

Переход от реакции к проактивности. Продемонстрированные возможности применения ML-моделей подтверждают реальность перехода от дорогостоящей модели «аварийного ремонта» к проактивному «обслуживанию по фактическому состоянию». Система, способная предсказывать утечки и выявлять аномалии на ранней стадии, является ключевым инструментом для такого перехода. При этом наиболее перспективной является гибридная стратегия, сочетающая несколько методов.

Данные – основа и одновременно главный барьер. Обсуждаемый пример (Таблица 1) наглядно показывает, что главной проблемой на пути

внедрения ИИ является не столько сложность алгоритмов, сколько качество и полнота исходных данных. Прежде чем внедрять сложные нейросетевые модели, необходимо решить базовые задачи: провести аудит, калибровку и дооснащение сетей первичными средствами измерения (датчиками). Без достоверных данных любая ML-модель будет генерировать ложные результаты.

Экономическая целесообразность. Несмотря на значительные первоначальные инвестиции в инфраструктуру сбора данных и программное обеспечение, долгосрочный экономический эффект очевиден. Он складывается из прямого сокращения потерь теплоносителя и энергии, снижения затрат на ликвидацию крупных аварий, оптимизации режимов работы источников тепла и, как следствие, уменьшения расхода топлива.

Ограничения исследования. Следует признать, что данная работа носит концептуальный характер. Результаты получены на ограниченном наборе данных путем симуляции. Для подтверждения выводов и оценки реальной точности моделей необходимо проведение пилотного проекта на реальном участке тепловой сети с верифицированными и полными данными за длительный период, охватывающий разные сезоны.

Информация о финансировании

Статья выполнена в рамках исследования, финансируемого Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (АР 25795155 «Разработка интеллектуальной системы автоматизированного управления и анализа аномалий в теплоснабжении городских районов с применением технологий искусственного интеллекта»).

Выводы

Анализ реальных эксплуатационных данных систем ЦТ в Казахстане подтверждает острую необходимость во внедрении автоматизированных систем диагностики. Продемонстрированные аномалии (инверсия давления, дисбаланс масс) свидетельствуют о глубоких проблемах с качеством данных и состоянием оборудования.

Методы машинного обучения предлагают иерархический подход к обнаружению аномалий.

Isolation Forest может служить системой быстрого реагирования для выявления отдельных нетипичных измерений в реальном времени.

Автоэнкодеры являются мощным инструментом для глубокой диагностики, позволяя обнаруживать комплексные сбои и нарушения физических законов в работе системы.

Наиболее перспективной является гибридная стратегия, сочетающая несколько методов. Однако ее внедрение требует предварительного этапа по аудиту и модернизации измерительной инфраструктуры, без которого

невозможно обеспечить необходимое для обучения ML-моделей качество данных.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Концепция развития топливно-энергетического комплекса Республики Казахстан на 2023 – 2029 годы.

2 Официальные отчеты Комитета по делам строительства и жилищно-коммунального хозяйства Министерства промышленности и строительства РК.

3 Национальный проект «Технологический рывок за счет цифровизации, науки и инноваций» (ранее ГП «Цифровой Казахстан»).

4 Wang, K., Ma, L., Xiong, Q., Liang, S., Sun, G., Yu, X., Liu, T. Learning to detect local overheating of the high-power microwave heating process with deep learning // IEEE Access. – 2018. – Vol. 6. – pp. 10288-10296.

5 Protić M. P., Ilić Z. M., Krstić V., Stojanović M. B. Utilizing Unmanned Aerial Vehicles for Detecting Heat Losses in District Heating Networks // 2024 59th International Scientific Conference on Information, Communication and Energy Systems and Technologies (ICEST). – IEEE, 2024. – P. 1–4.

6 Утенбергенов И. Т., Сейтбекова А. М. Анализ методов обнаружения аномалий в данных для использования в задачах аналитики и управления теплоснабжением города // Вестник АУЭС. – 2022. – Т. 3. – № 58.

7 Архив ОCB от города – URL: <https://clc.is/p5wm> (дата обращения: 12.06.2025).

8 Casseti, L. A., Fattori, F., Dénarié, A., Pozzi, M., Spirito, G., Motta, M. Spatial clustering in energy system modelling: application to the case study of District heating // Energy Systems. – 2025. – pp. 1-36.

9 Vollmer, E. M., Ruck, J., Volk, R., Schultmann, F. Detecting district heating leaks in thermal imagery: A Comparison of anomaly detection methods // Automation in Construction. – 2024. – Vol. 168, Part A. – Art. 105709.

10 Tarkhan N., Drury B. Crawley, Linda K. Lawrie, Christoph Reinhart. Generation of representative meteorological years through anomaly-based detection of extreme events // Journal of Building Performance Simulation. – 2025. – P. 1–18.

11 An, J., Cho, S. Variational autoencoder based anomaly detection using reconstruction probability // Special Lecture on IE. – 2015. – Vol. 2(1). – pp. 1-18.

REFERENCES

1 *Koncepciya razvitiya toplivno-energeticheskogo kompleksa Respubliki Kazakhstan na 2023 – 2029 gody* [Concept of development of fuel and energy complex of the Republic of Kazakhstan for 2023 – 2029].

2 *Oficial'nye otchety Komiteta po delam stroitel'stva i zhilishchno-kommunal'nogo hozyajstva Ministerstva promyshlennosti i stroitel'stva RK* [Official reports of the Committee for Construction and Housing and Communal Services of the Ministry of Industry and Construction of the RK].

3 *Nacional'nyj proekt «Tekhnologicheskij ryvok za schet cifrovizacii, nauki i innovacij»* (ranee GP «Cifrovoy Kazakhstan») [National project «Technological breakthrough through digitalization, science and innovations» (formerly SE «Digital Kazakhstan»)].

4 **Wang, K., Ma, L., Xiong, Q., Liang, S., Sun, G., Yu, X., Liu, T.** Learning to detect local overheating of the high-power microwave heating process with deep learning // *IEEE Access*. – 2018. – Vol. 6. – P. 10288-10296.

5 **Protić M. P., Ilić Z. M., Krstić V., Stojanović M. B.** Utilizing Unmanned Aerial Vehicles for Detecting Heat Losses in District Heating Networks // *2024 59th International Scientific Conference on Information, Communication and Energy Systems and Technologies (ICEST)*. – IEEE, 2024. – P. 1–4.

6 **Utepbergenov I. T., Sejtbekova A. M.** Analiz metodov obnaruzheniya anomalij v dannyh dlya ispol'zovaniya v zadachah analitiki i upravleniya teplosnabzheniem goroda [Analyzing data anomaly detection methods for use in analytics and urban heat control tasks] // *Vestnik AUES*. – 2022. – T. 3. – № 58.

7 *Arhiv OSV ot goroda* [OSV archive from the city]. – URL: <https://clc.is/p5wm> (Data obrashcheniya: 12.06.2025).

8 **Cassetti, L. A., Fattori, F., Dénarié, A., Pozzi, M., Spirito, G., Motta, M.** Spatial clustering in energy system modelling: application to the case study of District heating // *Energy Systems*. – 2025. – P. 1–36.

9 **Vollmer, E. M., Ruck, J., Volk, R., Schultmann, F.** Detecting district heating leaks in thermal imagery: A Comparison of anomaly detection methods // *Automation in Construction*. – 2024. – Vol. 168, Part A. – Art. 105709.

10 **Tarkhan N., Drury B. Crawley, Linda K. Lawrie, Christoph Reinhart.** Generation of representative meteorological years through anomaly-based detection of extreme events // *Journal of Building Performance Simulation*. – 2025. – P. 1–18.

11 **An, J., Cho, S.** Variational autoencoder based anomaly detection using reconstruction probability // *Special Lecture on IE*. – 2015. – Vol. 2(1). – P. 1–18.

Поступило в редакцию 02.07.25
Поступило с исправлениями 22.07.25
Принято в печать 05.09.25

*И. Т. Утепбергенів¹, *А. М. Сейтбекова², Л. К. Абжанова³*

^{1,2,3}Ғұмарбек Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.

02.07.25 ж. баспаға түсті.

22.07.25 ж. түзетулерімен түсті.

05.09.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

ЖЫЛУ ЖЕЛІЛЕРІН БАСҚАРУДЫҢ БЕЛСЕНДІ МОДЕЛІНЕ КӨШУ ҮШІН ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТТІ ҚОЛДАНУ

Қазақстан Республикасында орталықтандырылған жылумен жабдықтау жүйелері физикалық тозудың жоғары деңгейімен сипатталады, бұл айтарлықтай жылу шығынына және жоғары апаттылыққа әкеледі. Оқиға бойынша әрекет етуге негізделген дәстүрлі пайдалану әдістері экономикалық тұрғыдан тиімсіз және тиімсіз сенімділікті қамтамасыз етпейді. Бұл зерттеудің мақсаты жылу желілерін басқарудың проактивті моделіне көшу үшін нақты операциялық деректерге сүйене отырып, жылумен жабдықтау жүйелеріндегі ауытқуларды талдау және анықтау үшін машиналық оқыту әдістерін (ML) қолдану тәсілін әзірлеу болып табылады. Жылу жүктемесін болжау және жабдықтың ағып кетуін, екпінін және істен шығуын уақтылы анықтау үшін ауытқуларды табу сияқты болжамды талдаудың негізгі міндеттері қарастырылған. Классикалық шекті бақылаудан бастап кластерлеу (DBSCAN), ансамбльдік модельдер (Isolation Forest) және нейрондық желілік тәсілдер (автоэнкодерлер) сияқты жетілдірілген алгоритмдерге дейін анықтау әдістерінің салыстырмалы сипаттамасы жасалған. ML модельдерін қолданудың көрсетілген мүмкіндіктері қымбат «апаттық жөндеу» моделінен «нақты жағдай бойынша қызмет көрсету» проактивті моделіне көшудің шындығын растайды. Зерттеу көрсеткендей, қарастырылып отырған мәселе үшін машиналық оқытудың бірнеше әдістерін біріктіретін гибриді жасанды интеллект стратегиясы ең тиімді болып табылады.

Кілтті сөздер: орталықтандырылған жылумен жабдықтау, ауытқулар, машиналық оқыту, талдау, болжамды диагностика.

*I. T. Utepbergenov¹, *A. M. Seitbekova², L. K. Abzhanova³*

1, 2, 3Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after Gumarbek Daukeyev, Republic of Kazakhstan, Almaty

Received 02.07.25

Received in revised form 22.07.25

Accepted for publication 05.09.25

APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE FOR TRANSITION TO A PROACTIVE MODEL OF HEAT NETWORK OPERATION

District heating systems in the Republic of Kazakhstan are characterized by a high level of physical deterioration, which leads to significant heat losses and high accident rates. Traditional methods of operation based on incident response are economically inefficient and do not provide proper reliability. The aim of this research is to develop an approach to apply machine learning (ML) techniques for analyzing and detecting anomalies in heat supply systems based on real operational data to move towards a proactive model of heat network management. Key tasks of predictive analysis such as heat load forecasting and anomaly detection for timely detection of leaks, gaps and equipment failures are reviewed. A comparative description of detection methods is provided: from classical threshold control to advanced algorithms such as clustering (DBSCAN), ensemble models (Isolation Forest) and neural network approaches (autoencoders). The demonstrated applications of ML models confirm the reality of moving from a costly “emergency repair” model to a proactive “maintenance by actual condition” model. The study has shown that for the issue at hand, a hybrid artificial intelligence strategy combining several machine learning methods is the most promising.

Keywords: district heating, anomalies, machine learning, analysis, predictive diagnostics.

МРНТИ 45.41.33

<https://doi.org/10.48081/WMQZ8050>***Д. М. Чныбаева¹, Ю. А. Цыба²**

^{1,2}Ғұмарбек Даукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7297-0661>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2688-7976>

*e-mail: danna_shyn@mail.ru

WIRELESSHART ТЕХНОЛОГИЯСЫ БОЙЫНША МАГИСТРАЛЬДЫҚ ҚҰБЫРДАҒЫ ГАЗДЫҢ АҒУЫН БАҚЫЛАУ

Мақалада құбырдағы теріс қысым толқынын (NPW) бақылау арқылы магистральдық газ құбырында (МГ) тасымалдау кезінде газдың ағып кетуін анықтау бойынша өзекті мәселе шешіледі. Бұл бақылаудың ғылыми жаңалығы мынада теріс қысым толқындары құбыр бойымен таралу сымсыз интеллектуалды Wireless HART жүйесінің сандық қысым датчиктерімен бүкіл ұзындығы бойынша бақыланады. Бұл жүйені қолдану газдың ағып кетуін нақты уақыт режимінде анықтауға мүмкіндік береді, тіпті ең аз ағып кетудің жоғары сезімталдығын қамтамасыз етеді, ал деректердің дәлдігі маңызды артықшылық болып табылады, өйткені сандық датчиктер мен машиналық оқыту технологияларын пайдалану жаңылыс іске қосылу санын азайтуға және жүйенің жалпы сенімділігі мен тиімділігін арттыруға мүмкіндік береді. Бұл мониторинг тек газдың ағып кетуін ғана емес, сонымен қатар оны Wireless HART технологиясы негізінде ағып кету нүктесінде оқшаулауға мүмкіндік береді. Негізгі модульдерді қамтитын желілік сымсыз сенсорлық желілерге (LWSN) арналған ағып кетуді анықтау жүйесінің толық архитектуралық диаграммасы берілген, сонымен қатар графикалық пайдаланушы интерфейсін, серверлік дерекқорды және аралық бағдарламалық құралды қамтитын SimpliMote қолданбасының интерфейсі ұсынылған. Бұл жағдайда қосымшаны танымал платформаларда дербес компьютерден немесе Android негізіндегі мобильді құрылғылардан басқаруға болады. WirelessHART

технологиясы жоғары сенімділігі, қауіпсіздігі және желінің өзін-өзі қалтына келтіру қабілетінің арқасында сымсыз бақылаудың негізгі құралы ретінде таңдалды.

Кілтті сөздер: компрессорлық станция, магистральдық газ құбыры, ағып кету, сымсыз датчик, сандық басқару, газ айдау қондырғысы, асинхронды қозғалтқыш.

Кіріспе

Мұнай немесе газды магистральдық құбыр арқылы тасымалдау кезінде туындайтын төтенше жағдайлардан әлемдегі бірде-бір ел кепілдік бермейді. Сондықтан жеңіл көмірсутектердің жанғыш фракциялары бар құбырдың тұтастығын бақылау өте маңызды [1, 2, 3, 240-259-бб.].

МГҚ-да газдың ағуы, әдетте, құбырдың жасанды зақымдалуымен немесе топырақтың табиғи ығысуымен және шөгуімен байланысты, сонымен қатар құбырды дайындау кезінде ақаудың болуы және оны төсеу кезінде технологияның бұзылуы жоққа шығарылмайды. Жоғарыда аталған жағдайлардың кез келгені SU сейсмикалық датчиктерімен бекітілуі мүмкін тербелістерді тудырады [3, 240-259-бб.].

Магистральдық мұнай және газ құбырларындағы қысымға негізделген ағып кетуді оларды бақылау кезінде анықтаудың және оқшаулаудың әртүрлі әдістері бар [4, 75-бб. 5, 11-16-бб. 6, 443-456-бб.]. Біз ұсынатын әдіс ағып кетуді анықтау үшін машиналық оқытумен (ML) біріктірілген құбырдағы теріс қысым толқынын (NPW) таратылған енгізуді пайдаланады. Бұл әдіс WirelessHART сандық сымсыз технологиясына негізделген бірқатар маңызды артықшылықтарға ие [7, 51-бб.]. Сымсыз сенсорлық желілердегі бұл тапсырмаға орталықтандырылған тәсіл басқаруды басқару және деректерді жинаумен салыстырғанда енгізу шығындары аз болған кезде ақпаратты сандық беру жылдамдығы мен оның тығыздығында бірқатар артықшылықтарға ие [7, 51-бб. 8, 537-бб. 9, 148-бб.].

Материалдар мен әдістері

Wireless HART сандық сымсыз қысым датчиктері қысымның өзгеруін бақылау үшін құбыр бойымен орнатылады, ал сейсмикалық датчиктер (SU) құбырдың зақымдануын уақтылы анықтау және ағып кетудің алдын алу мәселесін шешеді [1, 10, 2084-2096-бб.]. Газ құбыры зақымдалған жағдайда, SU датчиктері монитордағы нақты зақымдану орнын көрсете отырып, басқару орталығының операторына, сондай-ақ МГ желісі бойында орналасқан араласу командаларына сымсыз дабыл хабарламасын беруді қамтамасыз етеді. Дабылды жылжымалы компьютерге ала отырып, апатты жою үшін күзет көліктермен зақымдану аймағына жақын орналасқан араласу тобы шығады. Бұл ретте осы аймақта МГ газ беру тоқтатылады.

SU датчиктері бір – бірінен шамамен 200-300 м қашықтықта орнатылады және құбыр арқылы немесе құбырдың екі жағынан 10 м қашықтықта құбыр мен жер беті арасындағы тереңдікте орналастырылады, осылайша бірнеше датчиктердің блогын құрайды. Датчиктердің әр блогы аймақтың сипаттамаларына байланысты жеке идентификаторы бар дербес объект болып табылады (1 сурет).

WirelessHART қысым датчиктері деректерді радиоарна арқылы жібере алады, бұл оларды қызметкерлердің деректерді үздіксіз бақылау мүмкіндігі жоқ жағдайларда қолдануға ыңғайлы етеді. Екіншіден, датчиктерден алынған мәліметтер нақты уақыт режимінде жиналады және талданады. SimpliMote бағдарламасының алгоритмдері бұл деректерді DF100-HSE/WirelessHART™ контроллерінде өңдейтін, қысымның кез келген өзгерістеріне жедел жауап беруге және ықтимал апаттардың алдын алуға мүмкіндік беретін ағып кетудің тән белгілерін анықтау. Сонымен қатар, ағып кету анықталған жағдайда, жүйе операторға автоматты түрде хабарлайды және ағып кетуді жою әрекеттерін бастайды, бұл ықтимал шығындарды азайтады.



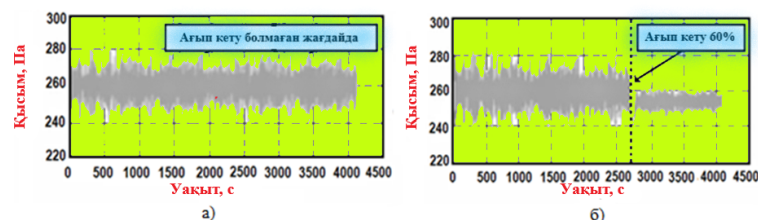
1-сурет – WirelessHART технологиясы негізінде магистральдық газ құбыры бойындағы газдың ағуын анықтау әдістемесіне құрылымдық сұлбасы

Осылайша, сандық басқаруды газ айдау станцияларына біріктіру тек жаңа басқару алгоритмдерін әзірлеуді ғана емес, сонымен қатар қысым деректерін талдау, басқару шешімдерін қабылдау және бұрыннан бар жүйелермен үйлесімділікті қамтамасыз ету үшін бағдарламалық қамтамасыз етуді қажет етеді [9, 148-бб. 11, 2084-2096-бб.12, 18-32-бб.]. Сондықтан, Машиналық оқыту технологияларымен біріктірілген теріс қысым толқыны

әдісі газды тасымалдауда жүйенің жоғары дәлдігі мен сенімділігін қамтамасыз ететін құбырлардағы газдың ағып кетуін анықтаудың тиімді шешімі болып табылады.

Нәтижелер және талқылау

Құбырдағы ағып кетулер мен жарылыстар құбыр ішіндегі сұйықтық бойымен өтетін қысым толқынының өтуіне әкеледі. Ағып кету нүктесі қарама-қарсы бағытта бірдей мөлшердегі өтпелі үдерістердің екі толқынын тудырады. Сұйықтықтың жоғары қысымына байланысты ағып кету өтпелі сигналда әлсіреуді тудырады, осылайша NPW тудырады. 2-суретте магистральдық құбырдағы қысымның осциллограммалары ағып кету болмаған кезде және ағып кетудің 60% болған кезде келтірілген.



2-урет – Ағып кету болмаған кезде газ қысымы (а) және 60% ағып кету бар кезде уақытқа байланысты (б)

Құбырдағы газдың аздап ағуы кезінде ағып кету орнындағы қысым аздап төмендейді, бұл мұндай ағып кетуді анықтауды қиындатады. Қалыпты және қалыптан тыс жағдайлар арасындағы қысым айырмашылығы минималды және кестеде көрсетілген.

Кесте 1 - Газдың әр түрлі ағып кетуіндегі параметрлердің салыстырмалы кестесі

Параметр	Шамалы ағып кету	Аса ағып кету
Қысымның төмендеуі	Елеусіз	Маңызды
Қысымның өзгеруі	Баяу	Жылдам
Қысым толқындарының амплитудасы	Кіші	Үлкен
Қысым толқындарының қарқындылығы	Төмен	Жоғары
Анықтау	Қиын	Жеңіл

Демек, қалыпты және қалыптан тыс жағдай арасындағы қысымның өте аз айырмашылығына байланысты баяу және аз ағып кету қиынырақ болады.

Бұл жағдайда қысым мәніндегі газдың аз және үлкен ағуы арасындағы негізгі айырмашылық қысымның өзгеру шкаласы мен жылдамдығында, сондай-ақ пайда болатын қысым толқындарының амплитудасы мен қарқындылығында.

WirelessHART қысым датчиктері арқылы ағып кету орнын анықтау үшін уақыт деректерін талдау және датчиктерді құбыр бойымен тарату әдісі қолданылады. Үдеріс бірнеше негізгі кезеңдерді қамтиды, олардың әрқайсысы жүйенің дәлдігі мен сенімділігін қамтамасыз етуде маңызды рөл атқарады.

WirelessHART қысым датчиктері құбыр бойымен бір-бірінен белгілі бір қашықтықта орнатылғандықтан, олар дербес бақылауға және нақты уақыттағы деректерді сымсыз жіберуге қабілетті, бұл олардың жоғары қозғалғыштығын және ағып кету орнын анықтау үшін пайдаланудың қарапайымдылығын қамтамасыз етеді. Уақыт деректеріне сүйене отырып, қысым толқынының ағып кету орнынан әр датчикке дейін қанша уақыт өтуі қажет екендігі есептеледі. Бұл ағып кетудің нақты орнын анықтауға көмектеседі. Бұл ретте жүйе сигналдың өту уақытын ескере отырып, құбырды аймақтарға бөледі және жақын орналасқан датчиктер LNPW функцияларын алатын және шлюздер арқылы деректерді орталық басқару жүйесіне жіберетін «сенсорлық қауымдастықтарды» құру үшін топтарға біріктіріледі.

Газдың ағып кету орнын анықтау үшін инженерлік гидравликадан келесі формулаларды қолдануға болады. Ағынның әртүрлі нүктелеріндегі қысымды, жылдамдықты және биіктікті байланыстыратын Бернулли теңдеуі. Газ құбырының мәнінде оны келесідей жазуға болады:

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho g h_1 = P_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \rho g h_2 + \Delta P_{тр}, \quad (1)$$

мұндағы $\Delta P_{тр}$ – үйкеліс салдарынан қысымның шығыны, Па;
P – қысым, Па;

v – газ ағысының жылдамдығы, м/с;

g – ауырлық күшінің үдеуі, 9,8 м/с² тең;

h – биіктік, м.

Қысымның айтарлықтай өзгеруі байқалатын орташа және жоғары қысымды газ құбырларының гидравликалық жүйелерін есептеу кезінде газ тығыздығының өзгеруі, оның жылдамдығы және температураның Цельсий бойынша нөлден ауытқуы сияқты әртүрлі параметрлерді ескеру қажет [13, 148-бб.]. Осы газ құбырларындағы үйкеліс күштерін жеңуге байланысты қысымның шығынын есептеу формулалары сәйкес келеді:

– орташа және жоғары қысымды газ құбырлары үшін

$$p_n^2 - p_k^2 = \frac{16}{\pi^2} \cdot \lambda \cdot \frac{G_0^2}{d^5} \cdot \rho_0 \cdot P_0 \cdot l \cdot \frac{T}{T_0}, \quad (2)$$

мұндағы p_n – газ құбырының басындағы абсолютті газ қысымы, МПа;

p_k – газ құбырының соңындағы абсолютті газ қысымы, МПа;

P_0 – 0.101325 МПа;

λ – гидравликалық үйкеліс коэффициенті;

G_0 – газ шығыны, м³/с, қалыпты жағдайда;

d – газ құбырының ішкі диаметрі, м;

ρ_0 – қалыпты жағдайда газдың тығыздығы, кг/м³;

l – тұрақты диаметрлі газ құбырының есептік ұзындығы, м;

T – газ температурасы, °С;

T_0 – қалыпты жағдайда газдың температурасы, 0° С.

Дарси-Вейсбах формуласы құбырлардағы үйкеліс салдарынан қысымның шығынын есептеу үшін қолданылады:

$$\Delta P_f = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \rho \cdot \frac{v^2}{2}, \quad (3)$$

мұндағы ΔP_f – 1 газ құбыры аймағындағы гидравликалық кедергіні еңсеруге қысымның шығыны;

f – Дарси үйкеліс коэффициенті;

L – құбырдың ұзындығы, м;

D – құбырдың ішкі диаметрі, м;

v – газ қозғалысының жылдамдығы, м/с;

ρ – газдың тығыздығы, кг/м³.

Құбырдағы газ қозғалысының орташа жылдамдығы келесі өрнектен анықталады:

$$v = \frac{Q}{A}, \quad (4)$$

мұндағы Q – газдың көлемдік шығыны, м³/с;

A – құбырдың көлденең қимасының ауданы, м².

Ағынның жылдамдығына, құбырдың диаметріне және газдың тұтқырлығына байланысты оның ағыны ламинарлы болуы мүмкін, бұл бір-біріне қатысты сырғитын қабаттар түрінде реттелген қозғалысты немесе ағында құйындар пайда болатын және қабаттар араласатын турбулентті қозғалысты білдіреді.

Газ құбырындағы газдың қозғалысы белгілі бір формула бойынша газ температурасын ескере отырып есептелетін Рейнольдс санына байланысты:

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu},$$

мұндағы ρ – газдың тығыздығы, кг/м³;

D – құбырдың ішкі диаметрі, м;

v – газдың орташа жылдамдығы, м/с;

μ – T температурадағы газдың динамикалық тұтқырлығы, м²/с.

Ламинарлы қозғалыстың турбулентті қозғалысқа өту аралығы критикалық деп аталады және $Re = 2000 - 4000$. $Re < 2000$ кезінде ағын ламинарлы, ал $Re > 4000$ кезінде турбулентті болады.

Жүргізілген талдаудан инженерлік гидравлика (1-5) формулалары магистральдық мұнай құбырларындағы (МҚ) мұнай қозғалысының режимдерін есептеу үшін де, магистральдық газ құбырларындағы (МГҚ) газ қозғалысының режимдері үшін де қолданылады.

Осылайша, МҚ-дағы мұнайдың ағып кетуіне ұқсас, МГҚ-дағы газдың ағыуы LD400WH датчиктерімен бекітілуі мүмкін теріс қысым толқындарын (NPWT) тудырады, содан кейін сәйкестендіріледі. Негізгі модульдерді қамтитын сызықтық сымсыз сенсорлық желілерге (LWSN) арналған ағып кетуді анықтау жүйесінің толық архитектуралық диаграммасы 3-суретте көрсетілген.



3-сурет—LWSN үшін ағып кетуді анықтау жүйесі

Бұл жүйе сонымен қатар -40-тан +80 °С-қа дейінгі температура ауытқуларын TT400W датчиктерімен басқара алады және магистральдық газ құбырының SU сейсмикалық датчиктерімен зақымдануын жаза алады.

Магистральдық газ құбырының технологиялық параметрлерін бақылау үшін WirelessHART технологиясына негізделген SimpliMote сымсыз датчиктерін пайдалану ЭГАА электр жетегін басқаруды жаңа, жоғары сапалы деңгейге көтереді. SimpliMote қашықтан бақылау технологиясын пайдалану газ құбырының жай-күйін бақылауға және алаңдатарлық жағдайлар туралы уақтылы хабарлауға мүмкіндік береді. SimpliMote қосымшасының интерфейсі 4-суретте көрсетілген.

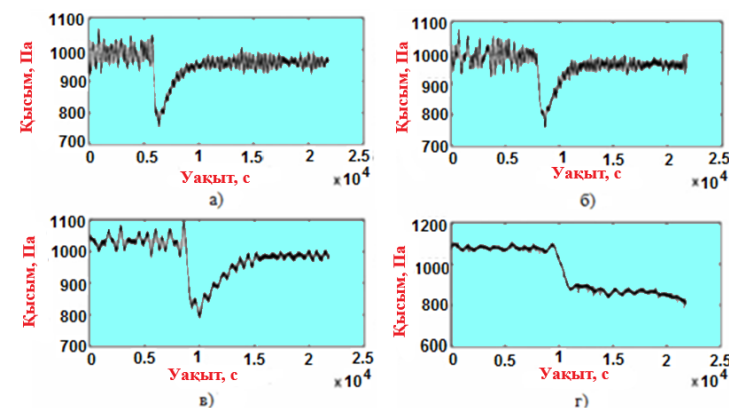
Бұл қосымша графикалық пайдаланушы интерфейсін, серверлік дерекқорды және аралық бағдарламалық құралды (БК) қамтиды. Қосымшаны танымал платформаларда дербес компьютерден немесе Android негізіндегі мобильді құрылғылардан басқаруға болады.

Интернет арқылы қосымшаға қол жеткізу үлкен артықшылық болып табылады, өйткені ол құбырдың күйін басқаруға және бақылауға мүмкіндік береді. Қосымша 4 күй параметрін ескереді: үдеу, батарея заряды, температура және қысым. Олардың көрсеткіштері одан әрі әрекет ету үшін шешім қабылдауға мүмкіндік береді.



4-сурет – SimpliMote қолданбасының пайдаланушы интерфейсі

Әр түрлі ағып кету қатынасы бар клапандарға арналған қысым кесіндері 5-суретте көрсетілген.



5-сурет – Пайыздық қысым кезінде ағып кету графиктері:
а) 25%, б) 50%, в) 75%, г) 100%

Өзірленген әдістеме мен ағып кетуді анықтау жүйесін тестілеу Ғұмарбек Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университетінің 122 Б корпусындағы зертханалық стендте жүргізілді [14, 58-бб.]. Сынақ қондырғысына диаметрі 7,62 см құбыр кіреді. Сығылған ағынды ортаны құбырға беру үшін қозғалтқыш пен резервуар қолданылады. Жасанды ағып кетуді жасау үшін әртүрлі мөлшердегі бес клапан қолданылады: 0,635 см, 1,27 см, 1,905 см, 2,54 см және 3,81 см. SimpliMote қысым датчиктері деректерді екі шлюз құрылғысы және бір деректерді тарату құрылғысы арқылы қосымша интерфейсіне жібереді.

Деректерді өңдеу дискретті Добеши түрлендірулерін қолдана отырып, шуды жоюды қамтыды, содан кейін деректер Калман сүзгісімен тегістелді. Содан кейін ағып кетудің жиілік компоненттерін анықтау үшін спектрлік талдау жүргізілді, ал оқытылған нейрондық желі әлеуетті ағып кетулерді жіктеу және анықтау үшін тазартылған және түрлендірілген деректерді талдады. Нәтижелерді растау және нақтылау үшін регрессиялық талдау қолданылды, бұл ағып кетудің орны мен мөлшерін дәлірек анықтауға мүмкіндік берді.

Осылайша, әдістің жоғары сезімталдығы тіпті аса шамалы ағып кетулерді анықтауға мүмкіндік береді, бұл жүйенің сенімділігін айтарлықтай арттырады. Сонымен қатар, әдіс ағып кетуді тез анықтауға мүмкіндік береді, өйткені олар пайда болған кезде құбырдағы қысым күрт төмендейді, бұл қысым толқындарының лезде пайда болуына әкеледі.

Бұл толқындар құбыр бойымен таралады, бұл ағып кетуді нақты уақытта анықтауға мүмкіндік береді. Сонымен қатар, әдіс ресурстарды тиімді пайдалануды қамтамасыз ететін есептеу тапсырмаларын бөлу арқылы жүйеге жүктемені азайтады. Деректердің дәлдігі де маңызды артықшылық болып табылады, өйткені сандық датчиктер мен машиналық оқыту технологияларын пайдалану жаңылыс іске қосу санын азайтуға және жүйенің жалпы тиімділігін арттыруға мүмкіндік береді.

Қорытынды

WirelessHART технологиясы жоғары сенімділігі, қауіпсіздігі және желінің өзін-өзі қалпына келтіру қабілетінің арқасында сымсыз бақылаудың негізгі құралы ретінде таңдалды.

Газдың ағып кетуін жедел анықтау және оқшаулау үшін құбырдағы қысымды бақылау әдістемесі әзірленді және сипатталды. Сымсыз датчиктерден алынған деректерді пайдаланатын алгоритмдер мен процедуралар ағып кетудің нақты орнын анықтау және оларды жою үшін жедел шаралар қабылдау үшін егжей-тегжейлі сипатталған. Сонымен қатар, ұсынылған әдіс ағып кетуді тез анықтауға мүмкіндік береді, өйткені олар пайда болған кезде құбырдағы қысым күрт төмендейді, бұл қысым толқындарының лезде пайда болуына әкеледі. Бұл толқындар құбыр бойымен таралады, нақты уақыт режимінде ағып кетуді анықтауға мүмкіндік береді, тіпті ең аз ағып кетуді анықтауда жоғары сезімталдықты қамтамасыз етеді және деректердің дәлдігі маңызды артықшылық болып табылады, өйткені сандық датчиктер мен машиналық оқыту технологияларын пайдалану жалған іске қосудың санын азайтуға және жүйенің жалпы сенімділігі мен тиімділігін арттыруға мүмкіндік береді.

ПАЙДАЛАНҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

1 Технология WirelessHART™. article_334_280.pdf.

2 Чныбаева, Д. М., Цыба, Ю. А., Кузьмин, Ю. В., Шыныбай, Ж. С., Алмуратова, Н. К. Способ и система мониторинга технологических параметров магистральных трубопроводов. Патент на полезную модель РК №6773. Полное описание полезной модели к патенту доступно на официальном сайте www.kazpatent.kz в разделе «Государственный реестр полезных моделей Республики Казахстан» от 24.12.21.

3 Chnybayeva, D. M., Tsyba, Yu. A., Almuratova, N. K. Linear monitoring of the main pipeline by means of wireless digital technology. [Text] // NEWS of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan SERIES OF GEOLOGY AND TECHNICAL SCIENCES. -2023. - № 457. - P. 240-259. <https://doi.org/10.32014/2023.2518-170X.273>.

4 Yang, S. H. Wireless Sensor Networks. [Text] // Principles, Design and Applications. New York, NY, USA: Springer, Oct. – 2013. – P. 75.

5 Mohamed, N., Jaroodi, J. A., Jawhar, I., Eid, A. «Reliability analysis of linear wireless sensor networks.» [Text] // – in Proc. IEEE 12th Symp. Netw. Comput Appl. – 2013. – P.11–16.

6 Salman, Ali., Adnan, Ashraf., Saad Bin, Qaisar. SimpliMote: A Wireless Sensor Network Monitoring Platform for Oil and Gas Pipelines. [Text] // – In Proc. IEEE Symp. Wireless Telecomm. – 2016. – P. 443 – 456.

7 Рахматулин, Н. М., Цыба, Ю. А. Анализ и перспективы цифрового управления агрегатов газоперекачивающих станций. [Текст] // - Международный научный журнал «АКАДЕМИК». – 2024. – №1 (250). – С. 51.

8 Антропов, П. Г., Долиннина, О. Н., Кузьмин, А. К., Шварц, А. Ю. Использование интеллектуальных систем для диагностики неисправностей газоперекачивающих агрегатов. [Текст] // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 6 (125). – С. 537. – <https://s.science-education.ru/pdf/2013/6/537.pdf>.

9 Широков, А. Н., Кожевников, А. В., Курбатов, В. И., Чукалкин, А. В. Системы автоматического управления и регулирования газоперекачивающих агрегатов [Текст]. // Учебное пособие. – М: Издательский центр «Академия». – 2018. – С. 148.

10 Датчик давления LD400WH. <https://www.smar.com.br/en/product/LD400WH-wirelesshart-pressure-level-and-flow-transmitters>.

11 S. Kouro, M., Malinowski, K., Gopakumar, J., Pou, L. G., Franquelo, B., Wu, J., Rodriguez, M. A., Perez, J., Leon, L. «Recent advances and industrial applications of multilevel converters» [Text] // IEEE Trans.Ind.Electron. – 2010. № 8. – P. 2084–2096.

12 Чныбаева, Д. М., Цыба, Ю. А., Шыныбай, Ж. С. Компрессорлық станциялардың газ айдау агрегаттарының электр жетегін жаңғырту [Текст] // Вестник АУЭС. – 2022. № 2 (57). – С. 18–32.

13 Комина, Г. П., Прошутинский, А. О. Гидравлический расчет и проектирование газопроводов [Текст] // СПбГАСУ, – СПб. – 2010. - С.148.

14 Цыба, Ю.А., Чныбаева, Д. М., Тойгожинова, Ж. Ж. Частотно-регулируемый электропривод в АСУТП (методические указания по выполнению лабораторных работ для магистрантов специальности 7М07101 –Электроэнергетика) [Текст] // - Алматы: АУЭС. – 2024. - С. 58.

REFERENCES

1 Technologia WirelessHART™ [Text] // WirelessHART™ technology. article_334_280.pdf.

2 **Chnybayeva, D. M., Tsyba, Yu. A., Kuzmin, Yu. V., Shynybay, Zh.** Sposob i sistema monitoringa tekhnologicheskikh parametrov magistral'nykh truboprovodov. [Method and system for monitoring the technological parameters of main pipelines.] [Text] // Patent for utility model RK No. 6773. A full description of the utility model for the patent is available on the official website www.kazpatent.kz in the section «State Register of Utility Models of the Republic of Kazakhstan» dated 12/24/21.

3 **Chnybayeva, D.M., Tsyba, Yu.A., Almuratova, N.K.** Linear monitoring of the main pipeline by means of wireless digital technology. [Text] // NEWS of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan SERIES OF GEOLOGY AND TECHNICAL SCIENCES. – 2023. – № 457. – P. 240–259. <https://doi.org/10.32014/2023.2518-170X.273>.

4 **Yang, S. H.** Wireless Sensor Networks. [Text] // Principles, Design and Applications. New York, NY, USA: Springer, Oct. – 2013. – P. 75.

5 Mohamed, N., Jaroodi, J. A., Jawhar, I., Eid, A. «Reliability analysis of linear wireless sensor networks.» [Text] // – in Proc. IEEE 12th Symp. Netw. Comput Appl., Aug. – 2013. – P. 11–16.

6 **Salman, Ali., Adnan, Ashraf., Saad Bin, Qaisar.** SimpliMote: A Wireless Sensor Network Monitoring Platform for Oil and Gas Pipelines. [Text] // - In Proc. IEEE Symp. Wireless Telecomm, Apr. – 2016. – P. 443–456.

7 **Rakhmatulin, N. M., Tsyba, Yu.A.** Analiz i perspektivy tsifrovogo upravleniya agregatov gazoperekachivayushchikh stantsiy [Analysis and prospects for digital control of gas pumping station units] [Text] // - International scientific journal «ACADEMIC». – 2024, № 1(250). - P. 51.

8 **Antropov, P.G., Dolinina, O.N., Kuzmin, A.K., Shvarts, A.Yu.** Ispol'zovaniye intellektual'nykh sistem dlya diagnostiki neispravnostey gazoperekachivayushchikh agregatov [Using intelligent systems to diagnose faults in gas pumping units] [Text] // Modern problems of science and education. – 2013. – № 6 (125) – P. 537. <https://s.science-education.ru/pdf/2013/6/537.pdf>

9 **Shirokov, A. N., Kozhevnikov, A. V., Kurbatov, V. I., Chukalkin, A. V.** Sistemy avtomaticheskogo upravleniya i regulirovaniya gazoperekachivayushchikh agregatov [Automatic control and regulation systems for gas pumping units] [Text] // Study guide. – M: Publishing Center «Academy». – 2018. – P. 148.

10 Datchik davleniya LD400WH [Pressure sensor LD400WH]. – <https://www.smar.com.br/en/product/LD400WH-wirelesshart-pressure-level-and-flow-transmitters>.

11 **S. Kouro, M., Malinovski, K., Gopakumar, J., Pou, L., Franquelo, G. B., Wu., J., Rodriguez, M. A., Perez, J., Leon, L.** «Recent advances and industrial applications of multilevel converters» [Text] // IEEE Trans. Ind. Electron. – 2010. – № 8. – P. 2084–2096.

12 **Chnybayeva, D.M., Tsyba, Yu.A., Shynybay, Zh. S.** Compressorlyk stationlardyn gas aidau aggregatetarynyn electric zhetegin zhangyrtu [Modernization of the electric power industry of gas pumping units of compressor stations] [Text] // AUES Bulletin. – 2022. №. 2(57). – P.18–32.

13 **Komina, G. P., Proshutinsky, A. O.** Gidravlicheskiy raschet i proyektirovaniye gazoprovodov [Hydraulic calculation and design of gas pipelines] [Text] // SPbGASU, – St. Petersburg. – 2010. – P.148.

14 **Tsyba, Yu.A., Chnybayeva, D.M., Toygozhinova, Zh. Zh.** Chastotno-reguliruyemyy elektroprivod v ASUTP [Variable-frequency electric drive in automated process control systems (methodological instructions for performing laboratory work for undergraduates in the specialty 7M07101 – Electrical power engineering)] [Text] // – Almaty: AUES. – 2024. – P. 58.

Received 15.02.25

Received in revised form 30.05.25

Accepted for publication 05.09.25

*Д. М. Чныбаева¹, Ю. А. Цыба²

^{1,2}Алматинский университет энергетики и связи имени

Гумарбека Даукеева, Республика Казахстан г. Алматы

Поступило в редакцию 15.02.25

Поступило с исправлениями 30.05.25

Принято в печать 05.09.25

МОНИТОРИНГ УТЕЧКИ ГАЗА В МАГИСТРАЛЬНОМ ТРУБОПРОВОДЕ ПО ТЕХНОЛОГИИ WIRELESSHART

В статье решается актуальная проблема по определению утечки газа при его транспортировке в магистральном газопроводе (МГ), путём мониторинга волны отрицательного давления в трубопроводе (NPW). Научная новизна данного мониторинга заключается в том, что волны отрицательного давления распространяясь вдоль трубопровода контролируются по всей его длине цифровыми датчиками давления беспроводной интеллектуальной системой Wireless HART. Применение данной системы позволяет обнаружить утечку газа практически в реальном времени обеспечивая высокую чувствительность даже самых незначительных утечек, а точность данных, является важным преимуществом, поскольку использование цифровых датчиков и технологий машинного обучения позволяет минимизировать количество ложных срабатываний и повысить общую надёжность

и эффективность системы. Данный мониторинг позволяет выявить не только утечку газа, но и локализовать её в точке утечки на базе технологии WirelessHART. Приведена полная архитектурная диаграмма системы обнаружения утечек для линейных беспроводных сенсорных сетей (LWSN), включающая основные модули, а также представлен интерфейс приложения SimpliMote, который включает в себя графический интерфейс пользователя, серверную базу данных и промежуточное программное обеспечение. При этом управлять приложением можно на популярных платформах с персонального компьютера или мобильных устройств на базе Android. Технология WirelessHART была выбрана в качестве основного инструмента для беспроводного мониторинга благодаря своей высокой надежности, безопасности и способности к самовосстановлению сети.

Ключевые слова: компрессорная станция, магистральный газопровод, утечка беспроводной датчик, цифровое управление, газоперекачивающий агрегат, асинхронный двигатель.

*D. M. Chnybayeva¹, Yu. A. Tsyba²

^{1,2}Almaty University of Energy and Communications named after Gumarbek Daukeyev, Republic of Kazakhstan, Almaty

Received 15.02.25

Received in revised form 30.05.25

Accepted for publication 05.09.25

MONITORING OF GAS LEAKAGE IN THE MAIN PIPELINE USING WIRELESSHART TECHNOLOGY

Annotation. The article solves the urgent problem of determining gas leakage during its transportation in the main gas pipeline (MP) by monitoring the negative pressure wave in the pipeline (NPW). The scientific novelty of this monitoring lies in the fact that negative pressure waves propagating along the pipeline are monitored along its entire length by digital pressure sensors from the wireless intelligent Wireless HART system. The use of this system makes it possible to detect gas leaks in almost real time, ensuring high sensitivity of even the smallest leaks, and data accuracy is an important advantage, since the use of digital sensors and machine learning technologies minimizes the number of false alarms and increases the overall reliability and efficiency of the system. This monitoring allows you to detect not only a gas leak, but also to localize it at the leak point based on WirelessHART technology. A complete architectural diagram of a

leak detection system for linear wireless sensor networks (LWSN), including the main modules, is provided, as well as the SimpliMote application interface, which includes a graphical user interface, a server database, and middleware. At the same time, the application can be controlled on popular platforms from a personal computer or Android-based mobile devices. WirelessHART technology has been chosen as the primary tool for wireless monitoring due to its high reliability, security, and network self-repair capability.

Keywords: compressor station, main gas pipeline, leakage wireless sensor, digital control, gas pumping unit, asynchronous motor.

<https://doi.org/10.48081/HZRF2560>

**К. С. Шоланов¹, *Г. Ж. Асаинов², Н. Б. Жакипов³,
Е. А. Буранбаев⁴, В. П. Марковский⁵**

^{1,2,3,4} Казахский агротехнический исследовательский университет
имени С. Сейфуллина, Республика Казахстан, г. Астана

⁵Торайғыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2077-7883>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1330-5909>

³ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-7239-2095>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-4564-2225>

⁵ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8519-7679>

*e-mail: asainovgibrat@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ГЕНЕРИРОВАНИЯ И АККУМУЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПАРУСНОЙ ВЕТРОВОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Статья посвящена созданию системы генерирования и аккумуляции электрической энергии электрохимическим методом, в автономной парусной ветровой электростанции (ПВЭС) с качающимся парусом. В статье ставится цель создать эффективную электрохимическую систему аккумулирующую энергию, вырабатываемую ветровой парусной электростанцией, имеющей в своем составе шесть 3-х фазных синхронных генераторов переменного электрического тока. При этом на основе анализа существующих в ветроэнергетике решений, рассматривается случайный характер ветровой нагрузки, а также проблемы взаимодействия нескольких источников генерации энергии с различной реальной производительностью. Для решения поставленной задачи была создана принципиальная схема системы генерирования и аккумуляции электрической энергии, основанная на преобразовании переменного генерируемого тока в постоянный и дальнейшее параллельное соединение на общую шину с электрохимическими

вторичными элементами. Эта система обеспечивает потребителя переменным электрическим током требуемой мощности за счет применения инвертора. На основе разработанной схемы создана экспериментальная система генерирования и аккумуляции, содержащая подсистему автоматической защиты аккумуляторов от глубокого разряда. Проведены испытания экспериментальной системы на возможность функционирования. Результаты испытания показали, что разработанная система генерирования и аккумуляции может быть использована в созданном опытном образце парусной ветровой электростанции.

Ключевые слова: парусной ветровой электростанции, аккумуляции электрической энергии, ВИЭ, подстанция, синхронный генератор.

Введение

В настоящее время в связи с глобальным потеплением в следствии выбросов парниковых газов возникает необходимость замены органического топлива возобновляемыми источниками энергии (ВИЭ). Актуальным является использование ВИЭ в виде ветровых электростанций и повышение эффективности преобразования энергии ветра в электрическую энергию. В настоящее время широкое распространение в практике получили турбинные ветровые электростанции (ТВЭС) с горизонтальным [1;2] и вертикальным расположением осей роторов, включая роторные турбины Dargious и Savonious [3;4]. Для обеих видов ТВЭС проблемой остается непредсказуемость ветра, скорости и силы порывов ветра, часто изменяющиеся в короткие промежутки времени, а также то, что нижняя граница диапазона скоростей ветра, при котором ТВЭС функционируют с номинальной мощностью, является наличие постоянного ветра со скоростью от 10 м/с, что обуславливает территориальное ограничение по применению таких ВЭС [5;6;7]. Перспективной альтернативой ТВЭС является малая автоматически управляемая парусная ветровая электростанция (ПВЭС), созданная на основе научных исследований проведенных в работах [8;9;10]. Эти ПВЭС способны удовлетворить потребности населений обширных географических территорий и районов с малой скоростью ветра (от 2,5 м/с), при непредсказуемо изменяющихся направлений и величин скоростей ветра вплоть до ураганного [11;12].

Настоящая статья является продолжением работ по созданию и совершенствованию автономных малых парусных ветровых электростанций и направлено на бесперебойное энергообеспечение потребителей путем применения электрохимических систем накопления электрической энергии.

Известные работы в области накопления электрической энергии [13;14] свидетельствуют, что создание и совершенствование систем накопления являются актуальной и насущной проблемой в ветроэнергетике.

Материалы и методы

Описание парусной ветровой электростанции с зонтовым парусом

Как указывалось выше, в статье ставится задача формирования системы аккумулирования электрической энергии для ПВЭС, экспериментальный образец которой создан на основе проведенных ранее работ. ПВЭС имеет свои конструктивные особенности, являющиеся основной причиной для формирования новой схемы системы накопления электрической энергии. В связи с этим на примере экспериментального образца ниже дается описание



Рисунок 1. Экспериментальный образец ПВЭС с качающимся зонтовым парусом

особенностей конструкции ПВЭС (Рис.1). Как известно функционирование ПВЭ основано на новой технологии преобразования энергии ветра в электрическую энергию. Для реализации этой технологии применяется качающийся в пространстве

(как обратный маятник) рабочий орган составленный из паруса 1 в виде зонта с аэродинамическим профилем, расположенного на мачте 2 жестко связанного с верхней платформой 3 параллельного манипулятора Sholkor. Параллельный манипулятор состоит из шести актуаторов 4 имеющих в своем составе генераторы электрического тока 5. Актуаторы соединяют верхнюю платформу с нижней платформой (основанием). Параллельный манипулятор, благодаря своей топологии структуры, преобразует энергию пространственного движения рабочего органа в электрическую энергию. Это становится возможным из-за того, что каждый актуатор имеет систему преобразования возвратно-поступательного движения во вращательное движение вала электрической машины генерирующей электрический ток. Конструкция обеспечивает преимущество ПВЭС, а именно: генерирование электрической энергии независимо от изменения направления скорости ветра, а также функционирование при малой скорости ветра от 3 м/с. Отличительной особенностью конструкции ПВЭС является то, что она имеет шесть генераторов электрического тока, функционирующих независимо друг от друга и имеющих в реальное время разные частоты вращения.

В связи с этим возникает новая задача- синхронизации работы нескольких генераторов в одной ветровой электростанции. Очевидно то, что наличие и совместное функционирование нескольких генераторов вызывает также необходимость создания новой системы аккумулирования электрической энергии.

Результаты и обсуждение

Формирование системы генерирования и аккумулирования электрической энергии ПВЭС

Исходным источником энергии для ТВЭС и ПВЭС является энергия ветра. В этой связи с точки зрения генерации электрической энергии в ПВЭС можно использовать опыт применения систем генерирования в ТВЭС. В настоящее время в системах генерации электрической энергии в ТВЭС используется множество различных электрических машин. На основе анализа зарубежной литературы приведенной выше получены сравнительные характеристики генераторов применяемых в ТВЭС (табл.1). Как видно из таблицы, PMSG стабильно вырабатывает энергию с достаточно высокой эффективностью при любых скоростях ветра, даже при самых низких от 3 м/с. В этой связи для экспериментального образца ПВЭС выбран PMSG модели Naier Wind Power 1000W 24V/500rpm.

Таблица 1 – Сравнительная характеристика генераторов в системе ВЭС

Тип генератора	Преимущества	Недостатки
----------------	--------------	------------

Асинхронные генераторы (IG)	• Диапазон максимальной скорости • Не требуется наличия щеток • Реактивная и активная мощность полностью контролируется	• Обязательно наличие преобразователя мощности • Редуктор обязателен
Синхронные генераторы (SG)	• Диапазон максимальной скорости • Редуктор не обязателен • Реактивная и активная мощность полностью контролируется	• Достаточно компактного преобразователя для полевых работ • Требуется преобразователь мощности AC/DC/AC • Требуется многополюсный генератор в случае топологии с прямым приводом • Требуется дополнительный источник питания
Асинхронные генераторы с короткозамкнутым ротором (SCIG)	• Прочная конструкция и более простой механизм • Щетки не требуются • непроницаемость ротора • Подходит для работы с переменной скоростью • Защита со стороны сети повышена	• Требуется преобразователи со стороны сети и нагрузки. • требуется большее количество переключателей силового преобразователя, • не подходит для безредукторной работы в многопортовых системах.
Асинхронные генераторы с двойным питанием (DFIG)	• Диапазон скорости ограничен от -30% до 30% от синхронной скорости • Дешевый ШИМ инвертор малой мощности • Реактивная и активная мощность полностью контролируется	• Требуется контактные кольца • Требуется редуктор • Требуется дополнительный источник питания
Синхронные генераторы с постоянными магнитами (PMSG)	• Диапазон максимальной скорости • Не требуется редуктор • Реактивная и активная мощность полностью контролируется • Отсутствие щеток уменьшают ремонт	• Требуется преобразователь мощности AC/DC/AC • Многополюсный генератор (большой и тяжелый) • Требуется постоянные магниты

Как отмечалось, в ПВЭС [15] из-за случайного характера ветровой нагрузки возникает задача использования и соединения шести генераторов. Однако методы точной синхронизации и самосинхронизации не могут быть осуществлены для модуля генерирования ПВЭС, так как скорости

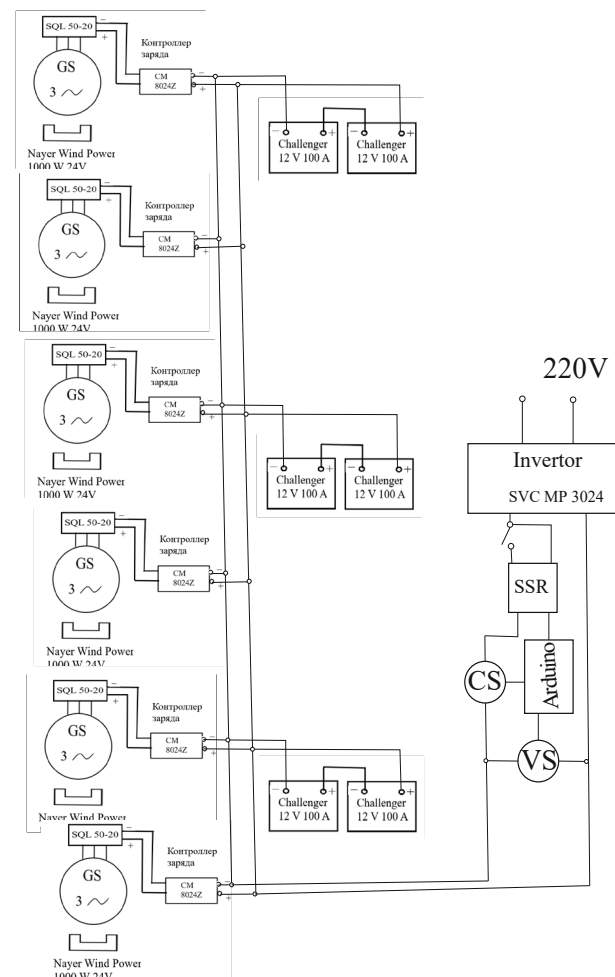


Рисунок 2 – Принципиальная схема системы генерирования и аккумуляции

Вращения генераторов большую часть времени являются не стабильными и в случайной степени различаются как по частоте и напряжению, так и по сдвигу фаз. Объединение генераторов переменного тока является очень проблематичным, т.к. существование амплитуды, частоты и сдвига фаз требует контроля каждого параметра. Наиболее сложным

является синхронизация всех фаз каждого источника переменного тока. Учитывая, что генераторы могут иметь различную входную механическую нагрузку в разные моменты времени, и смещение всех характеристик тока, запараллеливание генераторов переменного тока становится очень дорогостоящей задачей. В следствие этого предлагается использовать преобразование переменного трехфазного тока в постоянный с помощью выпрямителей SQL 50-10 с дальнейшим соединением генераторов выпрямленными одноименными полюсами в параллельном режиме по схеме представленной на рисунке 2. На этой схеме также представлены аккумулирующая система составленная из последовательно соединенных через контроллеры CM 8024 12/24V80A аккумуляторами.. Одноименные цепи от генераторов и от аккумуляторов подключаются к клеммам инвертора SVC MP 3024, с выхода которого переменное напряжение 220 В подается потребителю. Одной из особенностью данной системы является то, что предусматриваются дополнительные элементы для защиты аккумуляторов от глубокой разрядки. Для этого предусмотрен автоматический контроль, чтобы напряжение на одном элементе аккумулятора был не ниже 1,15 В. Для нашей системы из аккумуляторов составленных последовательным соединением 12 элементов, контролируемое напряжение составляет $V_k=13,8$ В.

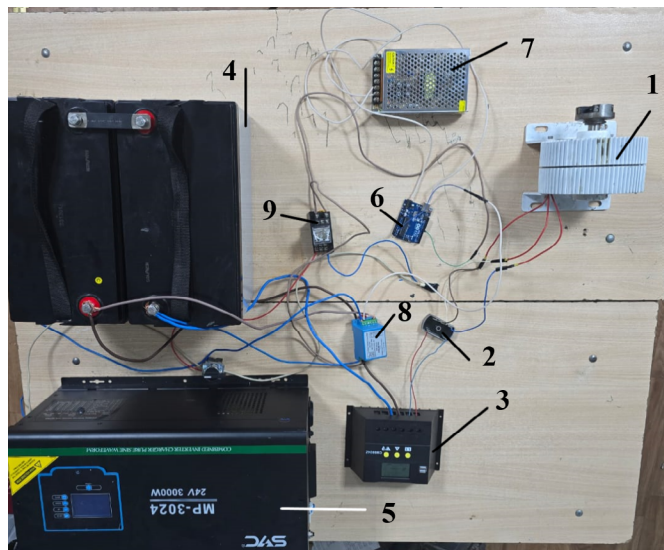


Рисунок 3 – Электрическая цепь системы генерирования и аккумулирования ПВЭС

Таким образом, включенная в систему аккумулирования дополнительная цепь, предназначена для отключения питания потребителя от аккумуляторов. На рисунке 3 представлена электрическая цепь по принципиальной схеме, представленной на рис.2, предназначенная для проверки функционирования системы аккумулирования и защиты аккумуляторов от глубокой разрядки. На рис.3 приняты следующие обозначения для элементов: 1 – синхронный генератор, 2-выпрямитель SQL 50-10, 3- контроллер заряда CM 8024 12/24V80A, 4- аккумуляторы на 24 В, 5-инвертор SVC MP 3024. Также для защиты аккумуляторов введены элементы: 6- контроллер Arduino, 7-преобразователь напряжения 24/5 В, 8-цифровой датчик напряжения HD-T1-3U, 9-реле РЭК77/3 10А 24В. Моделирование функционирования системы аккумулирования и системы защиты аккумуляторов проводилось путем приведения (с помощью дрели) вала генератора во вращательное движение и измерением напряжения на выходе инвертора. Система защиты срабатывала по данным $V_k=13,8$ В введенным с помощью скетча на Arduino и отключала соединение инвертора с аккумулятором с помощью реле при напряжении меньшем V_k .

Информация о финансировании

Данная научная работа является результатом, полученным в ходе реализации проекта ИРН № AP26198145 «Разработка конструкций, создание модификаций и систем аккумулирования энергии экспериментального образца автоматической парусной ветровой электростанции», финансируемого в рамках грантового финансирования от Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан.

Выводы

В связи с тем, что по технологии преобразования ветровой энергии в электрическую в опытном образце парусной ветровой электростанции используются шесть трехфазных синхронных генераторов переменного тока. Так как крутящий момент на валу генератора имеет случайный характер, генерируемый каждым генератором электрический ток отличается по характеристикам. Поэтому в статье рассматривается задача соединения этих генераторов для обеспечения стабильной электрической энергией потребителя. В статье создана принципиальная схема системы генерирования и аккумулирования электрической энергии, основанная на преобразовании переменного генерируемого тока в постоянный и дальнейшее параллельное соединение на общую шину с электрохимическими вторичными элементами. Эта система через инвертор на выходе обеспечивает потребителя переменным электрическим током требуемой мощности. На основе разработанной схемы создана экспериментальная модель системы генерирования и аккумулирования, содержащая подсистему автоматической

защиты аккумуляторов от глубокого разряда. Проведены испытания на экспериментальной модели. Испытания показали, что разработанная система генерирования и аккумуляирования с подсистемой защиты от глубокого разряда может быть использована в созданном опытном образце парусной ветровой электростанции

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 **Shkara, Y., Cardaun, M., Schelenz, R., Jacobs, G.** Aeroelastic response of a multi-megawatt upwind horizontal axis wind turbine. (HAWT) based on fluid–structure interaction simulation. // *Wind Energy Sci.* – 2020. – № 5. – P. 141–154.
- 2 **Bhutta, M. M. A., Hayat, N., Farooq Ali, A. U. Z., Jamil, S. R., Hussain, Z.** Vertical axis wind turbine – A review of various configurations and design techniques // *Renewable and Sustainable Energy Rev.* – 2012. – Vol. 4(16). – P. 1926–1939. DOI:10.1016/j.rser.2011.12.004
- 3 **Didane, D. H., Maksud, S. M., Zulkaffli, M. F., Rosly, N., Shamsudin, S. S., Khalid, A.** Performance investigation of a small Savonius-Darrius counter-rotating vertical-axis wind turbine. // *Int. J. Energy Res.* – 2020. – Vol. 44. – P. 9309–9316.
- 4 **Banna, H. U., Luna, A., Ying, S., Ghorbani, H., Rodriguez, P.** Impacts of wind energy in-feed on power system small signal stability // *International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*. Milwaukee : IEEE. – 2014. – P. 615–622. <https://doi.org/10.1109/ICRERA.2014.7016459>.
- 5 **Chien, W., Prinn, R. G.** Potential climatic impacts and reliability of very large-scale wind farms // *Atmos. Chem. Phys.* – 2010. – Vol. 10(4). – P. 2053–2061. DOI:10.5194/acp.2010.10.2053
- 6 **Kaoshan, D., Bergot, A., Liang, C., Xiang, W., Huang, Z.** Environmental issues associated with wind energy // *Renewable Energy.* – 2015. – Vol. 75. – P. 911–921. DOI:10.1016/j.renene.2014.10.074.
- 7 **Premalatha, M., Abbasi, T., Abbasi, S. A.** Wind energy : Increasing deployment, rising environmental concerns // *Renewable and Sustainable Energy Rev.* – 2014. – Vol. 31. – P. 270–288. DOI:10.1016/j.rser.2013.11.019
- 8 **Sholanov, K. S.** *Parallel Manipulators of Robots : Theory and Applications.* – Springer. 2020. – 164 p.
- 9 **Sholanov, K. S., Kabanbayev, A., Abzhaparov, K. M.** Study and Selection of Parameters of Automatically Controlled Wind Power Station with Swaying Sails // *International journal of renewable energy research.* – 2020. – Vol. 11(2). – P. 723–737. <https://doi.org/10.20508/ijrer.v10i2.10581.g7947>.

- 10 **Sholanov, K. S., Mirzabayev, B. I., Ceccarelli, M.** Expansibility of Electric Power Production by Sail Wind Power Stations // *International Journal of Mechanics and Control.* – 2021. – Vol. 22(02). – P. 117–126.
- 11 **Sholanov, K., Omarov, A., Ceccarelli, M.** Improving efficiency of converting wind energy in modified sail wind power station // *International Journal of Mechanics and Control.* – 2022. – Vol. 23(02). – P. 101–110.
- 12 **Sholanov, K. S., Zhakipov, N. S., Omarov, A. S., Assainov, G.** Assessment of Efficiency of Mechanical Energy Conversion into Electric Power in Sail Wind Power Station // *International Journal of Energy Research.* – 2024. – Vol. 2024(1). <https://doi.org/10.1155/2024/5931477>.
- 13 **Rajaram, R., Sathiyaraj, K.** An improved optimization technique for energy harvesting system with grid connected power for green house management // *Journal of Electrical Engineering & Technology.* – 2022. – Vol. 2022. – P. 1–13.
- 14 **Shekhar, H., Bhushan Mahato, C., Suman, S. K., Singh, S., Bhagyalakshmi, L., Prasad Sharma, M., Laxmi Kantha, B., Agraharam, S. K., Rajaram, A.** Demand side control for energy saving in renewable energy resources using deep learning optimization // *Electric Power Components and Systems.* – 2023. – Vol. 26;51(19). – P. 2397–2413.
- 15 **Шоланов, К. С., Токишева, Г. С., Омаров А. С., Кашкимбаева, Н.М., Исаева, Ж. Р.** Формирование данных для проектирования парусных ветровых электростанций // *Вестник Торайғыров университет.* – 2024. – № 2. – С. 421–433. <https://doi.org/10.48081/YRLV5945>.

REFERENCE

- 1 **Shkara, Y., Cardaun, M., Schelenz, R., Jacobs, G.** Aeroelastic response of a multi-megawatt upwind horizontal axis wind turbine. (HAWT) based on fluid–structure interaction simulation. // *Wind Energy Sci.* – 2020. – № 5. – P. 141–154.
- 2 **Bhutta, M. M. A., Hayat, N., Farooq Ali, A. U. Z., Jamil, S. R., Hussain, Z.** Vertical axis wind turbine – A review of various configurations and design techniques // *Renewable and Sustainable Energy Rev.* – 2012. – Vol. 4(16). – P. 1926–1939. DOI:10.1016/j.rser.2011.12.004
- 3 **Didane, D. H., Maksud, S. M., Zulkaffli, M. F., Rosly, N., Shamsudin, S. S., Khalid, A.** Performance investigation of a small Savonius-Darrius counter-rotating vertical-axis wind turbine. // *Int. J. Energy Res.* – 2020. – Vol. 44. – P. 9309–9316.
- 4 **Banna, H. U., Luna, A., Ying, S., Ghorbani, H., Rodriguez, P.** Impacts of wind energy in-feed on power system small signal stability // *International Conference on Renewable Energy Research and Applications*

(ICRERA). Milwakuee : IEEE. – 2014. – P. 615–622. <https://doi.org/10.1109/ICRERA.2014.7016459>.

5 Chien, W., Prinn, R. G. Potential climatic impacts and reliability of very large-scale wind farms // Atmos. Chem. Phys. – 2010. – Vol. 10(4). – P. 2053–2061. DOI:10.5194/acp.2010.10.2053

6 Kaoshan, D., Bergot, A., Liang, C., Xiang, W., Huang, Z. Environmental issues associated with wind energy // Renewable Energy. – 2015. – Vol. 75. – P. 911–921. DOI:10.1016/j.renene.2014.10.074.

7 Premalatha, M., Abbasi, T., Abbasi, S. A. Wind energy : Increasing deployment, rising environmental concerns // Renewable and Sustainable Energy Rev. – 2014. – Vol. 31. – P. 270–288. DOI:10.1016/j.rser.2013.11.019

8 Sholanov, K. S. Parallel Manipulators of Robots : Theory and Applications. – Springer. 2020. – 164 p.

9 Sholanov, K. S., Kabanbayev, A., Abzhaparov, K. M. Study and Selection of Parameters of Automatically Controlled Wind Power Station with Swaying Sails // International journal of renewable energy research. – 2020. – Vol. 11 (2). – P. 723–737. <https://doi.org/10.20508/ijrer.v10i2.10581.g7947>.

10 Sholanov, K. S., Mirzabayev, B. I., Ceccarelli, M. Expansibility of Electric Power Production by Sail Wind Power Stations // International Journal of Mechanics and Control. – 2021. – Vol. 22(02). – P. 117–126.

11 Sholanov, K., Omarov, A., Ceccarelli, M. Improving efficiency of converting wind energy in modified sail wind power station // International Journal of Mechanics and Control. – 2022. – Vol. 23(02). – P. 101–110.

12 Sholanov, K. S., Zhakipov, N. S., Omarov, A. S., Assainov, G. Assessment of Efficiency of Mechanical Energy Conversion into Electric Power in Sail Wind Power Station // International Journal of Energy Research. – 2024. – Vol. 2024(1). <https://doi.org/10.1155/2024/5931477>.

13 Rajaram, R., Sathiyaraj, K. An improved optimization technique for energy harvesting system with grid connected power for green house management // Journal of Electrical Engineering & Technology. – 2022. – Vol. 2022. – P. 1–13.

14 Shekhar, H., Bhushan Mahato, C., Suman, S. K., Singh, S., Bhagyalakshmi, L., Prasad Sharma, M., Laxmi Kantha, B., Agraharam, S. K., Rajaram, A. Demand side control for energy saving in renewable energy resources using deep learning optimization // Electric Power Components and Systems. – 2023. – Vol. 26;51(19). – P. 2397–2413.

15 Sholanov, K. S., Tokisheva, G. S., Omarov A. S., Kashkimbaeva, N. M., Isaeva, Zh. R. Formirovanie danny'x dlya proektirovaniya parusny'x vetrovy'x e'lektrostancij [Data generation for the design of sailing wind power plants] // Bulletin of the Toraigyrov University. – 2024. – № 2. – P. 421–433. <https://doi.org/10.48081/YRLV5945>.

Поступило в редакцию 02.06.25

Поступило с исправлениями 28.07.25

Принято в печать 05.09.25

К. С. Шоланов¹, *Г. Ж. Асаинов², Н. Б. Жакипов³, Е. А. Буранбаев⁴,
В. П. Марковский⁵

^{1,2,3,4}С. Сефуллина атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті,
Қазақстан Республикасы, Астана қ.

⁵Торайғыров университеті, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.

02.06.25 ж. баспаға түсті.

28.07.25 ж. түзетулерімен түсті.

05.09.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

ЖЕЛКЕНДІ ЖЕЛ ЭЛЕКТР СТАНЦИЯСЫНЫҢ ЭЛЕКТР ЭНЕРГИЯСЫН ӨНДІРУ МЕН ЖИНАҚТАУДЫҢ АВТОМАТТАНДЫРЫЛҒАН ЖҮЙЕСІН ЗЕРТТЕУ ЖӘНЕ ӘЗІРЛЕУ

Мақала желкенді желкенді жел электр станциясында (ЖЖЭС) электрохимиялық әдіспен электр энергиясын өндіру және жинақтау жүйесін құруға арналған. Мақалада құрамында алты 3 фазалы синхронды айнымалы ток генераторлары бар жел желкенді электр станциясы өндіретін энергияны сақтайтын тиімді электрохимиялық жүйені құру мақсаты қойылған. Сонымен қатар, жел энергетикасында бар шешімдерді талдау негізінде жел жүктемесінің кездейсоқ сипаты, сондай-ақ әртүрлі нақты өнімділікпен бірнеше энергия генерациялау көздерінің өзара әрекеттесу мәселелері қарастырылады. Тапсырманы шешу үшін электр энергиясын генерациялау және жинақтау жүйесінің схемалық схемасы құрылды, ол генерацияланған айнымалы тоқты электрохимиялық қайталама элементтері бар жалпы шинаға тұрақты және одан әрі параллель қосылуда айналдыруға негізделген. Бұл жүйе тұтынушыны Инверторды қолдану арқылы қажетті қуаттың айнымалы тоқымен қамтамасыз етеді. Өзірленген схема негізінде аккумуляторларды терең разрядтан автоматты түрде қорғаудың ішкі жүйесі бар эксперименттік генерациялау және жинақтау жүйесі құрылды. Эксперименттік жүйенің жұмыс істеу мүмкіндігіне сынақтар жүргізілді. Сынақ нәтижелері әзірленген генерациялау және жинақтау жүйесін желкенді жел.

Кілтті сөздер: желкенді жел электр станциясы, электр энергиясын жинақтау, ЖЭК, қосалқы станция, синхронды генератор.

K. S. Sholanov¹, *G. Assainov², N. B. Zhakipov³,
E. Burambayev⁴, V. P. Markovskiy⁵
^{1,2,3,4}S. Sefullin Kazakh Agrotechnical Research University
Republic of Kazakhstan, Astana
⁵Toraighyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar
Received 02.06.25
Received in revised form 28.07.25
Accepted for publication 05.09.25

RESEARCH AND DEVELOPMENT OF AN AUTOMATED POWER GENERATION AND STORAGE SYSTEM FOR A SAILING WIND POWER PLANT

The article is devoted to the creation of a system for generating and accumulating electrical energy by the electrochemical method in an autonomous sailing wind power plant (SWPP) with a swinging sail. The aim of the article is to create an efficient electrochemical energy storage system generated by a wind-powered sailing power plant consisting of six 3-phase synchronous alternating current generators. At the same time, based on the analysis of existing solutions in the wind energy industry, the random nature of the wind load is considered, as well as the problems of interaction between several sources of energy generation with different actual performance. To solve this problem, a schematic diagram of the electric energy generation and storage system was created, based on the conversion of alternating generated current into direct current and further parallel connection to a common bus with electrochemical secondary elements. This system provides the consumer with an alternating electric current of the required power through the use of an inverter. Based on the developed scheme, an experimental generation and storage system has been created, containing a subsystem for automatic protection of batteries from deep discharge. The experimental system has been tested for the possibility of functioning. The test results showed that the developed generation and storage system can be used in the created prototype of a sailing wind power plant.

Keywords: sailing wind power plant, electric energy storage, renewable energy sources, substation, synchronous generator.

АВТОРЛАР ТУРАЛЫ АҚПАРАТ

Андрашко Юрий, техника ғылымдарының кандидаты, доцент, жүйелік талдау және оңтайландыру теориясы кафедрасы, Ужгород ұлттық университеті, Ужгород, 88000, Украина, e-mail: yurii.andrashko@uzhnu.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0003-2306-8377>

Амренова Айгуль Жанузаковна, аға оқытушы, «Жылу энергетика» білім беру бағдарламасының докторанты, «Ғұмарбек Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, Алматы қ., 050013, Қазақстан Республикасы, e-mail: a.amrenova@aes.kz, <https://orcid.org/0000-0001-8295-7153>

Ахамбаев Руслан Саметович, докторант, магистр, Қ. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу техникалық университеті, Алматы қ., 050013, Қазақстан Республикасы, email: r.akhambayev@satbayev.university, <https://orcid.org/0000-0002-1707-7042>

Алькина Алия Даулетхановна, техника ғылымдарының кандидаты, «Энергетикалық жүйелер» кафедрасы, м.а.доцент, «Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ., 100008, Қазақстан Республикасы, e-mail: a.alkina@ktu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-4879-0593>

Абжанова Лауласын Касылгановна, техника ғылымдарының кандидаты, «Автоматтандыру және басқару» кафедрасы, меңгерушісі, Автоматтандыру және ақпараттық технологиялар институты, Ғұмарбек Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, Алматы, 050013, Қазақстан Республикасы, e-mail: l.abzhanova@aes.kz, <https://orcid.org/0000-0003-1781-269X>

Асаинов Гибрат Жоламанович, Phd, аға оқытушысы, Электрмен жабдықтау кафедрасы, Энергетикалық факультеті, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана қ., 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: Asainovgibrat@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1330-5909>

Алдиарбек Нурсулу Ермекқызы, PhD, Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу техникалық университеті, Алматы қ., 050013, Қазақстан Республикасы, e-mail: 981211400564-d@stud.satbayev.university, <https://orcid.org/0009-0009-2671-7943>

Анарбаев Алибек Ерсанович, аға оқытушы, энергетика факультеті, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: alibek_anarbaev@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6890-8005>

Абдрахманов Бауыржан Тендикович, аға оқытушы, энергетика факультеті, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: bauyrrymten@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0002-7817-1275>

Белошицкий Андрей, техника ғылымдарының докторы, профессор, Астана IT университетінің ғылым және инновациялар жөніндегі проректоры, Астана қ., 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: a.b@astanait.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0001-9548-1959>

Белошицкая Светлана, техника ғылымдарының докторы, профессор, «Астана IT университеті» есептеуіш техника және деректертану кафедрасы, Астана қ., 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: bsv@astanait.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-0856-5474>

Бондарцев Давид Юрьевич, PhD, профессор АЭЖБУ, ассоц. профессор, Ғ. Дәукеев атындағы Алматы Энергетика және Байланыс университеті, Энергетика және жасыл технологиялар институты, Алматы қ., 050013, Қазақстан Республикасы, e-mail: d.bondartsev@aes.kz, <https://orcid.org/0000-0001-8778-7851>

Байжолова Жания Жанатовна, Дәріскер, магистр, С. Сәдуақасов атындағы Агротехникалық институты, Ш. Уәлиханов атындағы Көкшетау университеті, Көкшетау қ., 020000, Қазақстан Республикасы, e-mail: zhania93@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0008-9535-1626>

Бекбаев Амангелді, техника ғылымдарының докторы, Қ. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу техникалық университеті, профессор, Алматы қ., 050013, Қазақстан Республикасы, email: a.bekbayev@satbayev.university, <https://orcid.org/0000-0003-3520-1710>

Бердімұрат Айнұр Дастановна, PhD, жетекші ғылыми қызметкері. ТОО «QazNRG Group», Алматы қ., 050060, Қазақстан Республикасы, email: tananova-ainura@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0001-6425-8778>

Белошицкий Евгений Андреевич, Бағдарламалық қамтамасыз ету инженериясы саласындағы ғылым бакалавры, Компьютерлік инженерия факультеті, Astana IT University, Астана қ., 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: bya20102005@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0008-9285-3145>

Балтин Алишер Талғатұлы, Электрмен жабдықтау кафедрасы, аға оқытушысы, Энергетикалық факультеті С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана қ., 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: aliserbaltin9@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4007-3987>

Бердалиев Али Даниярұлы, АО «Астана РЭК» инженері, Астана қ., 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: aberdaliev292@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0000-5080-470X>

Бердибеков Абдисаттар Опабекович, Аға оқытушы, техника және технология магистрі, «Энергетика» кафедрасы, Қ. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу техникалық университеті, Алматы қ., 050000, Қазақстан Республикасы, e-mail: a.berdibekov@satbayev.university, <https://orcid.org/0000-0001-5943-432X>

Бурамбаев Ерасыл Айгүргенұлы, Электрмен жабдықтау кафедрасы, докторант, Энергетикалық факультеті, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана қ., 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: erasil.b@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0007-4564-2225>

Бекенов Ермек, RTEL Telecom директоры Қазақстан Республикасы, Алматы қ. 050013, Қазақстан Республикасы, e-mail ybekenov@rtel.kz, <https://orcid.org/0009-0000-5201-0225>

Болатбек Асхат, докторант, әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық университеті, физика техникалық факультет, электроника және астрофизика кафедрасы, Алматы қ., 050038, Қазақстан Республикасы, e-mail: bolatbekaskhat98@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0004-7613-5507>

Бедыч Татьяна Витальевна, техника ғылымдарының кандидаты, бөлім меңгерушісі, инженерлік-технологиялық факультеті, Міржақып Дулатов атындағы Қостанай инженерлік-экономикалық университеті, Қостанай қ., 110000, Қазақстан Республикасы, e-mail: t.bedych@kineu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-3642-8917>

Бижанов Нұрлан Уәлиханұлы, «Электроэнергетика» мамандығының докторанты, А.Байтұрсынов атындағы Қостанай аймақтық университеті, Қостанай қ., 110000, Қазақстан Республикасы, e-mail: bizhanov_nurlan@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0044-6398>

Генбач Александр Алексеевич, техникалық ғылым докторы, профессор, Г. Даукеев атындағы Алматы Энергетика және Байланыс университеті, Энергетика және жасыл технологиялар институты, Алматы қ., 050013, Қазақстан Республикасы, e-mail: a.genbach@aes.kz, <https://orcid.org/0009-0001-3819-4387>

Глуценко Татьяна Ивановна, экономика ғылымдарының кандидаты, қауымд. профессор (доцент), А. Байтұрсынов атындағы Қостанай аймақтық университеті, Қостанай қ, 110000, Қазақстан Республикасы, e-mail: tatyana194@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5536-6304>

Даримбаева Назира Исенхановна, Энергиямен қамтамасыз ету, электр жетегі және электр техникасы кафедрасы, аға оқытушысы, Ғұмарбек Даукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, Алматы қ., 050013, Қазақстан Республикасы, e-mail: n.darimbaeva@aes.kz, <https://orcid.org/0009-0008-9787-2839>

Дайч Леонид Израелевич, аға оқытушы, Энергетика, автоматика және теле байланыс факультеті, «Әбілқас Сағынов атындағы, Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды, 100027, Қазақстан Республикасы, e-mail: l.daych@ktu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-9524-5857>

Достияров Абай Мухамедиярұлы, профессор, техника ғылымдарының докторы, Ғұмарбек Даукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, Алматы қ., 050013, Қазақстан Республикасы, e-mail: a.dostiyarov@aes.kz, <https://orcid.org/0000-0002-6559-8598>

Дружинин Валерий Михайлович, PhD докторы, «Энергетика» кафедрасының аға оқытушысы, Қарағанды индустриялық университеті, Энергетика, көлік және басқару жүйелері факультеті, Теміртау қ., 101400, Қазақстан Республикасы, <https://orcid.org/0000-0001-7261-8780>, e-mail: druzhinin_vm@mail.ru

Дүйсенбек Жансая Серікқызы, PhD, Инженериядағы экология және менеджмент кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Г.Даукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, Алматы, 050013, Қазақстан Республикасы, 010011, Қазақстан Республикасы, e-mail: zhaniko.adina@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7844-4240>

Дюсова Ризагуль Муслимовна, техника ғылымдарының кандидаты, «Механика және мұнай-газ ісі» кафедрасының постдокторанты, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: rizagulyussova@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3083-5255>

Дубинец Наталья Александровна, техника ғылымдарының магистрі, аға оқытушы, Торайғыров университеті, энергетика факультеті, Павлодар, 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: dubinecsm@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0008-2186-1930>

Джахметов Асанәлі, 7М06201 – «Телекоммуникация» мамандығы бойынша магистрант, Қ. И.Сәтбаев атындағы Қазақ Ұлттық Техникалық Зерттеу университеті, Автоматика және ақпараттық технологиялар институты, Алматы қ., 050013, Қазақстан Республикасы, e-mail: assanalijakhmetov@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0009-5754-8492>

Есмаханова Лаура Нурлановна, PhD, Автоматтандыру және телекоммуникация кафедрасы, Технологиялық факультет, М. Х. Дулати атындағы Тараз университеті, Тараз қ., 080000, Қазақстан Республикасы, e-mail: laura060780@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3308-9676>

Егзекова Анара Тлюлесовна, техника ғылымдарының кандидаты., АЛТ ассистент профессор, М. Тынышпаев атындағы АЛТ университеті, Алматы қ., 050016, Қазақстан Республикасы, e-mail: a.egzekova@alt.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-7756-765X>

Жақыпов Талғат Мұхамедхасанұлы, техника ғылымдарының кандидаты, Green Thermal Energy ЖШС директоры, Павлодар қ., 140000, Қазақстан Республикасы, e-mail: sultan_200779@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9725-0262>

Жаркымбекова Макпал Бексултановна, аға оқытушысы, Энергиямен қамтамасыз ету, электр жетегі және электр техникасы кафедрасы, Ғұмарбек Даукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, Алматы қ., 050013, Қазақстан Республикасы, e-mail: mak.zharkymbekova@au.es.kz, <https://orcid.org/0000-0002-2285-8716>

Жукенова Гюльнара Абаевна, PhD, қауымд. профессор, Сәулет-құрылыс факультеті, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: gulnara-home@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4096-5002>

Жаканов Алибек Нуржанович, «Құрылыс материалдарын, бұйымдарын және құрастырылымдарын өндіру» мамандығы бойынша докторант, Сәулет-құрылыс факультеті, Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана қ., 10000, Қазақстан Республикасы, e-mail: azhakanov8@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8747-3788>

Жантілесова Әсемгүл Бейсембайқызы, PhD, м. а. қауымд. профессор (доцент), Қазақ мемлекеттік университеті Сейфуллин, А., Қазақстан Республикасы, Астана қ., 010008, Қазақстан Республикасы, e-mail: acbizh@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3730-0579>

Жакипов Нажмитден Берекелиұлы, аға оқытушысы, «Электрмен жабдықтау кафедрасы, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана қ., 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: nazhmiden@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0005-7239-2095>

Жакманова Екатерина Андреевна, докторант, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана қ., 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: ekaterina.zakmanova1998@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0545-5912>

Жалмағамбетова Ұлтуар, PhD, Электротехника және автоматтандыру кафедрасы, қауымд. профессор, факультет Энергетика, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: ultuara@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2261-2222>

Иванов Валерий Анатольевич, PhD, и.о. доцента, Энергетика, автоматика және теле байланыс факультеті, «Әбілқас Сағынов атындағы, Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ., 100027, Қазақстан Республикасы, e-mail: V.ivanov@ktu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-2811-7908>

Исенов Жанат Сансызбайұлы, аға оқытушы, энергетика факультеті, "Электртехника және автоматтандыру" кафедрасы, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140007, Қазақстан Республикасы, e-mail: issenov.zh@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2388-602X>

Исаева Жазира Рахатдиновна, PhD, аға оқытушысы, Электрмен жабдықтау кафедрасы, Энергетикалық факультеті, «С.Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана қ., 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: Zhozi_maggi@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8146-8366>

Исенов Сұлтанбек, Сансызбаевич, техника ғылымдарының кандидаты, қауымд. профессор, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана қ., 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: isenovsultan@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4576-4621>

Исабеков Даурен Джамбулович, PhD, қауымд. профессор (доцент), Энергетика факультеті, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: Dauren_pvl2012@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6673-5646>

Имангазинова Динара Кенжетасовна, Академик Қ. Сәтбаев атындағы Екібастұз инженерлік-техникалық институтының магистрі, ОӘЖ проректоры, Екібастұз қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: dinaraigul@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0773-1781>

Кучанский Александр, техника ғылымдарының кандидаты, профессор, Есептеу және деректертану кафедрасы, Астана IT университеті, Астана қ., 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: kuchanskyi.o@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-1277-8031>

Қостаулетов Ырысбек Сайранұлы, Жылу энергетикасы мамандығы бойынша докторант, Сәулет, құрылыс және энергетика мектебі, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., 070004, Қазақстан Республикасы, e-mail: kustauletov21@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0009-7554-759X>

Карманов Амангельды Ерболович, PhD, қауымд. профессор, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: aman270685@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7512-0275>

Какабаев Нурбол Аязбаевич, PhD, кафедра меңгерушісі, қауымд. профессор, С. Сәдуақасов атындағы Агротехникалық институты, Ш. Уәлиханов атындағы Көкшетау университеті, Көкшетау қ., 020000, Қазақстан Республикасы, e-mail: nurbol.ka@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3892-9590>

Кабдулина Анара Тасболатовна, Дәріскер, магистр, С. Сәдуақасов атындағы Агротехникалық институты, Ш.Уәлиханов атындағы Көкшетау университеті, Көкшетау қ., 020000, Қазақстан Республикасы, e-mail: AKabdylina@shokan.edu.kz, <https://orcid.org/0009-0007-5077-4062>

Кириченко Лалита Николаевна, Industry.4.0 Ғылыми-инновациялық орталық кіші ғылыми қызметкері.4.0, Астана қ., 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: lalita17021996@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7069-5395>

Казамбаев Ильяс Маратулы, "Industry 4.0" ғылыми-инновациялық орталығы, Astana IT University, Астана қ., 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: i.kazambayev@astanait.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-0850-7490>

Командиров Евгений Витальевич, Техника ғылымдарының магистрі, автоматтандырылған басқару жүйелері және техникалық жүйелер инженері, «Атриум Строй Инвест» ЖШС, Павлодар қ.140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: yevgeniy.komandirov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3549-8393>

Кошкин Игорь Владимирович, техника ғылымдарының кандидаты, «Электр энергетикасы» кафедрасы Ахмет Байтұрсынұлы атындағы Қостанай өңірлік университеті, Қостанай қ., 110000, Қазақстан Республикасы, e-mail: elektroenergetika@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8637-3665>

Кислов Александр Петрович, техника ғылымдарының кандидаты, «Электротехника және автоматтандыру» кафедрасының профессоры, «Торайғыров университеті» коммерциялық емес акционерлік қоғамы, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы e-mail: kislovpsu@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4816-8008>

Каверин Владимир Викторович, техника ғылымдарының кандидаты, Профессордың міндетін атқарушы, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ., 100027, Қазақстан Республикасы, e-mail: kaverinkz@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2021-7445>

Калиаскаров Нурбол Балтабаевич, PhD, «Байланыс жүйелерінің технологиялар» кафедрасы, меңгерушісі, «Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ., 100000, Қазақстан Республикасы, e-mail: n.kaliaskarov@ktu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-3684-1488>

Құттыбай Нұржігіт Бакытұлы, доцент м.а., PhD, әл Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, физика техникалық факультет, электроника және астрофизика кафедрасы, Алматы қ., 050038, Қазақстан Республикасы, e-mail: Nurjigit.10.93@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5723-6642>

Казамбаев Ансар, студент, Энергетика факультеті, Электроэнергетика кафедрасы, Торайғыров Университеті, Павлодар қ., Қазақстан Республикасы, e-mail: kazambaevansar@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0005-5081-1623>

Каппарова Айнұр Аралбайқызы, докторант, физика техникалық факультет, электроника және астрофизика кафедрасы, әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық университеті, Алматы қ.,050047, Қазақстан Республикасы, e-mail: kapparova_ainur3@kaznu.edu.kz, <https://orcid.org/0009-0008-8348-902X>

Котов Евгений Сергеевич, PhD, аға оқытушы, Энергетика, автоматика және теле байланыс факультеті, «Әбілқас Сағынов атындағы, Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ., 100027, Қазақстан Республикасы, e-mail: e.kotov@ktu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-2660-2010>

Крыкбаева Мариям, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: mgn017@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0001-7808-8650>

Лисицын Дмитрий Владимирович, аға оқытушы, Энергетика, автоматика және теле байланыс факультеті, «Әбілқас Сағынов атындағы, Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ., 100027, Қазақстан Республикасы, e-mail: d.lisitsyn@ktu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-8800-9661>

Медетбек Арайлым, цифрлық мемлекеттік басқару магистрі, Астана IT университеті, Астана қ., 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: Arailym.Medetbek@astanait.edu.kz, <https://orcid.org/0009-0001-7192-0360>

Мусаханова Салтанат Татарбековна, аға оқытушы, Сәулет-құрылыс факультеті, Торайғыров университеті, Павлодар қ.,140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: musaxanova.saltanat@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2249-7292>

Мусаева Жанна Кубашевна, доцент, биология, ғылымдарының кандидаты, «Ғұмарбек Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті» коммерциялық емес акционерлік қоғамы, Алматы, 050013, Қазақстан Республикасы, e-mail: zh.musaeva@aes.kz, <https://orcid.org/0000-0003-4371-6159>

Минажова Саулеш Аманбаевна, PhD, қауымд. профессор Satbayev University, Алматы қ., 050013, Қазақстан Республикасы, email: s.minazhova@satbayev.university, <https://orcid.org/0000-0002-5461-2251>

Марат Нұрбек Олжасұлы, «Электр энергетика» мамандығы бойынша магистрант, «Энергетика» кафедрасы, Satbayev University, Алматы, 050000, Қазақстан Республикасы, e-mail: nurbek0355@gmail.com, ID: <https://orcid.org/0009-0000-3324-0260>

Мехтиев Али Джаван-ширович, техника ғылымдарының кандидаты, профессор, «Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, ғылым және инновациялар жөніндегі проректоры, Қарағанды, 100026, Қазақстан Республикасы, e-mail: barton.kz@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2633-3976>

Мукашева Динара Талғатқызы, техника және технологиялар магистрі, инженер-метролог, Қазақстан стандарттау және метрология институты, РМК Ғылыми-зерттеу жұмысы және оқыту басқармасының бас маманы, Астана қ., 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: dinara_north@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0002-9064-2711>

Маханова Махмуда Акпаровна, аға оқытушысы, Экономика ғылымдарының кандидаты, жылу энергетикасы кафедрасы, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана қ., 010011, Қазақстан Республикасы, e-mail: murassayahat@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0006-7090-869X>

Меңдібаев Серғазы Әмірғалиұлы, техника ғылымдарының кандидаты, доцент, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана қ., 010011, Қазақстан Республикасы, e-mail: seke47@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0003-8221-4802>

Налибаев Нурғали Жаксылыкович, магистр, ТОО «QazNRG Group» инженері, қ. Алматы, 050060, Қазақстан Республикасы, email: nurgali20091978@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5285-541X>

Нефтисов Александр Витальевич, PhD, қауымд. профессор, Дене шынықтыру және бұқаралық спорт академиясының ректораты, Астана қ., 010000, Қазақстан Республикасы, «Индустрия 4.0» ғылыми-инновациялық орталығы, Astana IT University, Астана қ., 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: a_neftisov@apems.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-4079-2025>

Новожилов Александр Николаевич, техника ғылымдарының докторы, профессор, Электр энергетикасы кафедрасы, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: novozhilova_on@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7530-5034>

Новожилов Тимофей Александрович, техника ғылымдарының кандидаты, доцент, Өнеркәсіптік кәсіпорындарды электрмен жабдықтау кафедрасы, Омбы мемлекеттік техникалық университеті, Омбы қ., 644050, Ресей Федерациясы, e-mail: timokvey@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0293-7852>

Нурсеитов Бакытжан Адилевич, Электр энергетика мамандығы бойынша докторант, «Энергетика» кафедрасы, Satbayev University, Алматы қ., 050000, Қазақстан Республикасы, e-mail: barakat_86@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0002-0714-9871>

Нұрмағанбетова Гүлім Сахитовна, PhD, қауымд. профессор міндетін атқарушы, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Энергетика факультеті, Астана қ. 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: g_sahitovna@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9529-2477>

Нешина Елена Генна-дьевна, техника ғылымдарының кандидаты, қауымд. профессор, Энергетикалық жүйелер кафедрасы, меңгерушісі, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ., 100026, Қазақстан Республикасы, e-mail: e.neshina@ktu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-8973-2958>

Наумов Владимир Викторович, PhD, постдокторант, Торайғыров университеті, Энергетика факультеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, <https://orcid.org/0009-0005-5837-4683>, e-mail: naumov.tou@outlook.com

Нарынбаев Дамир Серикович, магистр, KAZENERGY қауымд. атқарушы директоры, Астана қ., 010006, Қазақстан Республикасы, e-mail: d.narynbayev@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0004-9705-3420>

Орынбасар Саят Оразханұлы, докторант, әл-Фараби атындағы Қазақ физика техникалық факультет, электроника және астрофизика кафедрасы, Ұлттық университеті, Алматы қ., 050038, Қазақстан Республикасы, e-mail: Sayat.Orynbasar@kaznu.edu.kz, <https://orcid.org/0009-0001-9124-2560>

Онгар Булбул, PhD, қауымд. профессор, Қ. И.Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу техникалық университеті (ҚазҰТУ), Алматы қ., 050013, Қазақстан Республикасы, e-mail: b.ongar@satbayev.university, <https://orcid.org/0000-0002-8333-8343>

Потемкина Елена Борисовна, аға оқытушы, Энергетика, автоматика және теле байланыс факультеті, «Әбілқас Сағынов атындағы, Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ. 100027, Қазақстан Республикасы, e-mail: e.potemkina@ktu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-1124-7995>

Парамонов Александр Михайлович, техника ғылымдарының докторы, профессор, Омбы мемлекеттік техникалық университеті, Омбы қ., 644050, Ресей Федерациясы, e-mail: amparamonov@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0002-9271-2744>

Поддубный Александр Александрович, техника ғылымдарының кандидаты, Оқытушы, С. Сәдуақасов атындағы Агротехникалық институты, Ш. Уәлиханов атындағы Көкшетау университеті, Көкшетау қ., 020000, Қазақстан Республикасы, e-mail: poddubnyy.alexandr.c@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0002-0096-1891>

Поддубный Руслан Александрович, Дәріскер, С. Сәдуақасов атындағы Агротехникалық институты, Ш. Уәлиханов атындағы Көкшетау университеті, Көкшетау қ., 020000, Қазақстан Республикасы, e-mail: poddubnyy-ruslan@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0000-2008-4377>

Сакитжанов Мархабат Шахмаранович, аға оқытушысы, Энергиямен қамтамасыз ету, электр жетегі және электр техникасы кафедрасы, Ғұмарбек Даукеев атындағы Алматы энергетика және

байланыс университеті, Алматы қ., 050013, Қазақстан Республикасы, e-mail: m.sakitzhanov@au.es.kz, <https://orcid.org/0000-0002-0955-8938>

Саканов Қуандық Темирович, техника ғылымдарының кандидаты, профессор, Сәулет-құрылыс факультеті, Торайғыров университеті, Павлодар, 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: kuan_alter@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9959-5566>

Сакенов Балташ Канатович, техника ғылымдарының магистрі, докторанты, «Электр энергетикасы» кафедрасы, Ахмет Байтұрсынұлы атындағы Қостанай өңірлік университетінің Қостанай қ., 110000, Қазақстан Республикасы, e-mail: sakenovb996@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3457-0194>

Сәбиболда Әкежан Мұратұлы, PhD, Академик Ө. А. Жолдасбеков атындағы механика және машинатану институтының ғылыми жоба жетекшісі, Алматы қ., 050026, Қазақстан Республикасы, e-mail: sabibolda98@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1186-7940>

Смайлов Нұржігіт Құралбайұлы, PhD, Satbayev University, Автоматика және ақпараттық технологиялар институты, «Электроника, телекоммуникациялар және ғарыштық технологиялар кафедрасы, профессор, Алматы қ., 050013, Қазақстан Республикасы, e-mail: n.smailov@satbayev.university, <https://orcid.org/0000-0002-7264-2390>

Сағындық Әйгерім Бекенқызы, техника ғылымдарының кандидаты, профессор, Энергетика факультеті, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: aiko_90@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0376-2150>

Сейтбекова Айнагуль Манарбековна, аға оқытушысы, «Жас ғалым» гранттық қаржыландыру бойынша жоба жетекшісі, «Автоматтандыру және басқару» кафедрасы, Автоматтандыру және ақпараттық технологиялар институты, Ғұмарбек Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, Алматы қ., 050013, Қазақстан Республикасы, e-mail: a.seitbekova@au.es.kz, <https://orcid.org/0000-0002-2357-5937>

Сыбанбаева Дина Кадровна, докторант, әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық университеті, физика техникалық факультет, электроника және астрофизика кафедрасы, Алматы қ., 050038, Қазақстан Республикасы, e-mail: dinasybanbaeva627@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0005-8713-2042>

Сейтенова Гайни Жумағалиевна, химия ғылымдарының кандидаты, қауымд. профессор, «Мұнай-химия өнімдерін өндірушілер мен тұтынушылар қауымдастығы (Мұнай-химия қауымдастығы)» заңды тұлғалар бірлестігі, Астана қ., 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: gainiseitenova@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6202-3951>

Снопков Дмитрий, докторант, «Биология және экология» кафедрасы, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: snopkovdmitrii@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6907-9667>

Танырбергенов Нариман Мұратбекұлы, 8d07103-Жылу энергетикасы мамандығы бойынша докторант, Сәулет, құрылыс және энергетика мектебі, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., 070004, Қазақстан Республикасы, e-mail: tanir_n@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6354-5428>

Талипов Олжас Манарбекұлы, PhD, профессор, Торайғыров атындағы ҰАО Энергетика факультеті, деканы Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы, e-mail: talipov1980@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8355-1769>

Тойгожинова Жанар Жумакановна, аға оқытушысы, Энергиямен қамтамасыз ету, электр жетегі және электр техникасы кафедрасы, Ғұмарбек Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, Алматы қ., 050013, Қазақстан Республикасы, e-mail: zh.toygozhinova@au.es.kz, <https://orcid.org/0000-0001-6597-4728>

Төлешов Амандық Қуатулы, техника ғылымдарының докторы, профессор, Академик Ө. А. Жолдасбеков атындағы механика және машинатану институтының ғылыми жоба кеңесшісі, ҚР ҰҒА корреспондент-мүшесі, ҚР МИА академигі, Алматы қ., 050026, Қазақстан Республикасы, e-mail: aman_58@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9775-3049>

Тайсариева Кырмызы Нурлановна, PhD, қауымд. профессор. «Қ. И.Сәтбаев атындағы Қазақ Ұлттық Техникалық Зерттеу университеті, Автоматика және ақпараттық технологиялар институты, Алматы қ., 050013, Қазақстан Республикасы, e-mail: k.taisariyeva@satbayev.university, <https://orcid.org/0000-0002-1949-4288>

Таштай Ерлан, техника ғылымдарының кандидаты, профессор, Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ Ұлттық Техникалық Зерттеу университеті, Автоматика және ақпараттық технологиялар институты, Алматы қ., 050013, Қазақстан Республикасы, e-mail: y.yashtay@satbayev.university, <https://orcid.org/0000-0002-0809-537X>

Уахит Наурызбай Әсетұлы, докторант, «Жылуэнергетика» кафедрасы, Торайғыров университеті, Павлодар қ., 40008, Қазақстан Республикасы, e-mail: nauryzmc@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1626-2895>

Утепбергенов Ирбулат Түремұратович, техника ғылымдарының докторы, «Автоматтандыру және басқару» кафедрасы, профессор, Автоматтандыру және ақпараттық технологиялар институты, Ғұмарбек Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті,

Алматы, 050013, Қазақстан Республикасы, e-mail: i.utepbergenov@aes.kz,
<https://orcid.org/0000-0003-0758-4849>

Утебаев Думан Нурмуханбетович, «Электроэнергетика» мамандығының докторанты, А. Байтұрсынов атындағы Қостанай аймақтық университеті, Қостанай қ., 110000, Қазақстан Республикасы, e-mail: udn91@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0009-6129-8465>

Успанова Анастасия Игоревна, аға оқытушысы, магистрі, математика және физика кафедрасы, Ахмет Байтұрсынұлы атындағы Қостанай өңірлік университеті, Қостанай қ., 110000, Қазақстан Республикасы, e-mail: Kamorrasweet1@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3484-8750>

Хидолда Еркін, техника ғылымдарының кандидаты, қауымд. профессор, Энергетика» кафедрасы, Satbayev University, Алматы қ., 050000, Қазақстан Республикасы, e-mail: y.khidolda@satbayev.university, <https://orcid.org/0000-0001-7590-8134>

Цыба Юрий Александрович, техника ғылымдарының докторы, профессор, Энергиямен қамтамасыз ету және электр жетегі кафедрасы, Ғұмарбек Даукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, Алматы қ., 050000, Қазақстан Республикасы, e-mail: tsyba.46@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2688-7976>

Чныбаева Данна Максуткановна, аға оқытушысы, Энергиямен қамтамасыз ету және электр жетегі кафедрасы, Ғұмарбек Даукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, Алматы қ., 050000, Қазақстан Республикасы, e-mail: danna_shyn@mail.ru, d.chnybaeva@aes.kz, <https://orcid.org/0000-0001-7297-0661>

Шоланов Қорғанбай Сағнаевич, Техникалық ғылымдардың докторы, профессор, С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана қ., 010000, Қазақстан Республикасы, e-mail: sholkor@gmail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2077-7883>

Шимпф Алексей, зертхана меңгерушісі, Электротехника және автоматтандыру кафедрасы, Факультет, Энергетика, Торайғыров университеті Павлодар қ., 140000, Қазақстан Республикасы, e-mail: shimpf5329@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4203-9117>

Эм Геннадий Аркадиевич, техника ғылымдарының магистрі, аға оқытушысы, Өндірістік процестерді автоматтандыру кафедрасы, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды қ., 100027, Қазақстан Республикасы, <https://orcid.org/0000-0003-2639-0492>, e-mail: egaapp@mail.ru

Яманбекова Аяулым Конусбековна, PhD қауымд. профессор, «Ғұмарбек Даукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс

университеті, Алматы қ., 050013, Қазақстан Республикасы, e-mail: a.yamanbekova@aes.kz, <https://orcid.org/0000-0002-9670-5288>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Андрашко Юрий, кандидат технических наук, доцент, доцент департамента системного анализа и теории оптимизации, Ужгородский национальный университет, г. Ужгород, 88000, Украина, e-mail: yurii.andrashko@uzhnu.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0003-2306-8377>

Амренова Айгуль Жанузаковна, старший преподаватель, докторант образовательной программы «Теплоэнергетика», Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева, г. Алматы, 050013, Республика Казахстан, e-mail: a.amrenova@aes.kz, <https://orcid.org/0000-0001-8295-7153>

Ахамбаев Руслан Саметович, магистр, докторант Satbayev University, г. Алматы, 050013, Республика Казахстан, email: r.akhambayev@satbayev.university, <https://orcid.org/0000-0002-1707-7042>

Алькина Алия Даулетхановна, кандидат технических наук, И.о. доцента кафедры «Энергетические системы», «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова», г. Караганда, 100008, Республика Казахстан, e-mail: a.alkina@ktu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-4879-0593>

Абжанова Лауласын Касылгановна, кандидат технических наук, заведующая кафедрой «Автоматизация и управление», Институт автоматизации и информационных технологии, Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева, г. Алматы, 050013, Республика Казахстан, e-mail: l.abzhanova@aes.kz, <https://orcid.org/0000-0003-1781-269X>

Асаинов Гибрат Жоламанович, Phd, старший преподаватель, кафедра Электроснабжения, Энергетический факультет, Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: Asainovgibrat@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1330-5909>

Алдиарбек Нурсулу Ермакқызы, PhD студент, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева (КазННТУ), г. Алматы, 050013, Республика Казахстан, e-mail: <https://orcid.org/0009-0009-2671-7943>

Анарбаев Алибек Ерсанович, ст. преподаватель, Факультет энергетики, Торайғыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: alibek_anarbaev@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6890-8005>

Абдрахманов Бауыржан Тендикевич, ст. преподаватель, Факультет энергетики, Торайғыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: bauyrymten@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0002-7817-1275>

Белошицкий Андрей, доктор технических наук, профессор, проректор по науке и инновациям, Astana IT University, г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: a.b@astanait.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0001-9548-1959>

Белошицкая Светлана, доктор технических наук, профессор, профессор департамента вычислений и науки о данных, Astana IT University, г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: bsv@astanait.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-0856-5474>

Бондарцев Давид Юрьевич, PhD, профессор АУЭС, ассоц., профессор ВАК, Алматинский университет Энергетики и Связи имени Г. Даукеева, Институт энергетики и зеленых технологий, г. Алматы, 050013, Республика Казахстан, e-mail: d.bondartsev@aes.kz, <https://orcid.org/0000-0001-8778-7851>

Байжолова Жания Жанатовна, Лектор, магистр, Агротехнический институт имени С. Садвакасова, Кокшетауский университет имени Ш. Уалиханова, г. Кокшетау, 020000, Республика Казахстан, e-mail: zhania93@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0008-9535-1626>

Бердімұрат Айнұр Дастановна, PhD, ведущий научный сотрудник ТОО «QazNRG Group», г. Алматы, 050060, Республика Казахстан, email: tananova-ainura@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0001-6425-8778>

Белошицкий Евгений Андреевич, Бакалавр по специальности Software Engineering, Факультет Computer Engineering, Astana IT University, г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: bya20102005@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0008-9285-3145>

Балтин Алишер Талғатұлы, Старший преподаватель, кафедра Электроснабжения, Энергетический факультет, Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: aliserbaltin9@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4007-3987>

Бердалиев Али Даниярұлы, Инженер АО «Астана РЭК», г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: aberdaliev292@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0000-5080-470X>

Бердибеков Абдисаттар Опабекович, Старший преподаватель, Магистр техники и технологии, кафедра, «Энергетика» Satbayev University, г. Алматы, 050000, Республика Казахстан, e-mail: a.berdibekov@satbayev.university, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5943-32X>

Бурамбаев Ерасыл Айгургенулы, докторант, кафедра Электроснабжения, Энергетический факультет, «Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: erasil.b@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0007-4564-2225>

Бекенов Ермак, директор RTEL Telecom Алматы, Республика Казахстан, 050013, e-mail: ybekenov@rtel.kz, <https://orcid.org/0009-0000-5201-0225>

Болатбек Асхат, докторант, Казахский Национальный Университет имени аль-Фараби, физико-технический факультет, кафедра электроники

и астрофизики, г. Алматы, 050038, Республика Казахстан, e-mail: bolatbekaskhat98@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0004-7613-5507>

Бедыч Татьяна Витальевна, кандидат технических наук, заведующая кафедрой, инженерно-технологический факультет, Костанайский инженерно-экономический университет имени М. Дулатова, г. Костанай, 110000, Республика Казахстан, e-mail: bedych@kineu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-3642-8917>

Бижанов Нурлан Уалиханович, докторант по специальности «Электроэнергетика», Костанайский региональный университет имени А.Байтурсынова, г. Костанай, 110000, Республика Казахстан, e-mail: bizhanov_nurlan@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0044-6398>

Генбач Александр Алексеевич, доктор технических наук, профессор ВАК, Алматинский Университет Энергетики и Связи имени Г. Даукеева, Институт энергетики и зеленых технологий, г. Алматы, 050013, Республика Казахстан, e-mail: a.genbach@au.kz, <https://orcid.org/0009-0001-3819-4387>

Глуценко Татьяна Ивановна, кандидат экономических наук, и.о.ассистент профессора, Костанайский региональный университет имени А. Байтурсынова, г. Костанай, 110000, Республика Казахстан, e-mail: tatyana194@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5536-6304>

Даримбаева Назира Исенхановна, старший преподаватель кафедры Энергообеспечения, электропривода и электротехники, Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева, г. Алматы, 050013, Республика Казахстан, e-mail: n.darimbaeva@au.kz, <https://orcid.org/0009-0008-9787-2839>

Дайч Леонид Израелевич, ст. преподаватель, Факультет энергетики, автоматизации и телекоммуникаций, «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова», Караганда, 100027, Республика Казахстан, e-mail: daych@ktu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-9524-5857>

Достияров Абай Мухамедиярұлы, профессор, доктор технических наук, Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева, г. Алматы, 050013, Республика Казахстан, e-mail: a.dostiyarov@au.kz, <https://orcid.org/0000-0002-6559-8598>

Дружинин Валерий Михайлович, PhD, ст. преподаватель, кафедра «Энергетика», Карагандинский индустриальный университет, факультет энергетики, транспорта и систем управления, г. Темиртау, 101400, Республика Казахстан, <https://orcid.org/0000-0001-7261-8780>, e-mail: druzhinin_vm@mail.ru

Дуйсенбек Жансая Сериковна, Phd, ассоц. профессор, кафедра Экологии и менеджмент в инженерии, Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева, г. Алматы, 050013, Республика Казахстан, e-mail: zhaniko.adina@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7844-4240>

Дюсова Ризагуль Муслимовна, кандидат технических наук, постдокторант, кафедра «Механика и нефтегазовое дело», Торайғыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: rizagul_dyussova@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3083-5255>

Дубинец Наталья Александровна, магистр технических наук, старший преподаватель, Торайғыров университет, Факультет энергетики, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: dubinecsm@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0008-2186-1930>

Джахметов Асанәлі, магистрант, специальность, «Телекоммуникация» Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева, Института автоматизации и информационных технологий, г. Алматы, Республика Казахстан, 050013, e-mail: assanalijakhmetov@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0009-5754-8492>

Есмаханова Лаура Нурлановна, PhD, кафедра «Автоматизация и телекоммуникация» Технологический факультет, Таразский университет имени М. Х. Дулати, г. Тараз, 080000, Республика Казахстан, e-mail: laura060780@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3308-9676>

Жакупов Талгат Мухамедхасанович, кандидат технических наук, директор ТОО «Green Thermal Energy», г. Павлодар, 140000, Республика Казахстан, e-mail: sultan_200779@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9725-0262>

Жаркымбекова Макпал Бексултановна, Старший преподаватель, кафедра Энергообеспечения, электропривода и электротехники, Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева, г. Алматы, 050013, Республика Казахстан, e-mail: mak.zharkymbekova@au.kz, <https://orcid.org/0000-0002-2285-8716>

Жукенова Гюльнара Абаевна, PhD, ассоц., профессор, Факультет Архитектуры и строительства, Торайғыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: gulnara-home@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4096-5002>

Жаканов Алибек Нуржанович, докторант, специальность «Производство строительных материалов, изделий и конструкций», Архитектурно-строительный факультет, Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева, Астана, 10000, Республика Казахстан, azhakanov8@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8747-3788>

Zhantlessova Asemgul Beisembayevna, PhD, Acting Associate Professor, doctor Kazakh State University named after S.Seifullin, Republic of Kazakhstan, the city of Astana, 010008, e-mail: acbzh@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3730-0579>

Жакипов Нажмитден Берекелиулы, старший преподаватель, кафедра «Электроснабжение», Казахский агротехнический исследовательский

университет имени С. Сейфуллина, г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: nazhmiden@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0005-7239-2095>

Жакманова Екатерина Андреевна, докторант, Евразийского национального университета имени Л. Н. Гумилева, г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: ekaterina.zakmanova1998@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0545-5912>

Жалмагамбетова Ултуар, PhD, ассоц. профессор, кафедра «Электротехники и автоматизации», факультет, Энергетики, Торайғыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: ultuara@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2261-2222>

Иванов Валерий Анатольевич, PhD, и.о. доцента, Факультет, энергетики, автоматики и телекоммуникаций, Карагандинский технический, университет имени Абылкаса Сагинова, г. Караганда, 100027, Республика Казахстан, e-mail: V.ivanov@ktu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-2811-7908>

Исенов Жанат Сансызбаевич, ст. преподаватель, кафедра «Электротехника и Автоматизации», Факультет энергетики, Торайғыров университет, г. Павлодар, 140007, Республика Казахстан, e-mail: issenov.zh@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2388-602X>

Исаева Жазира Рахатдиновна, PhD, стр. преподаватель, кафедра Электроснабжения, Энергетический факультет, Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: Zhoozi_maggi@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8146-8366>

Исенов Султанбек Сансызбаевич, кандидат технических наук, ассоц. профессор, «Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: isenov_sultan@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4576-4621>

Исабеков Даурен Джамбулович, PhD, ассоц. профессор (доцент), факультет энергетики, Торайғыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: Dauren_pvl2012@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6673-5646>

Имангазинова Динара Кенжетасовна, магистр, проректор по УМР, Екибастузский инженерно-технический институт имени академика К. Сатпаева, г. Екибастуз, 141208, Республика Казахстан, e-mail: dinaraigul@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0773-1781>

Кучанский Александр, доктор технических наук, профессор департамента вычислений и науки о данных, Astana IT University, г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: kuchanskyi.o@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-1277-8031>

Кустаулетов Ырысбек Сайранович, докторант, специальность 8D07103- Теплоэнергетика, Школа архитектуры, строительства и энергетики, Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, г. Усть-Камногорск, 070004, Республика Казахстан, e-mail: kustauletov21@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0009-7554-759X>

Карманов Амангельды Ерболович, PhD, ассоц. профессор, Торайғыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: aman270685@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7512-0275>

Какабаев Нурбол Аязбаевич, PhD, Заведующий кафедрой, доктор ассоц. профессор, Агротехнический институт имени С. Садвакасова, Кокшетауский университет имени Ш. Уалиханова, г. Кокшетау, 020000, Республика Казахстан, e-mail: nurbol.ka@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3892-9590>

Кабдулина Анара Тасболатовна, Лектор, магистр, Агротехнический институт имени С. Садвакасова, Кокшетауский университет имени Ш. Уалиханова, г. Кокшетау, 020000, Республика Казахстан, e-mail: AKabdylina@shokan.edu.kz, <https://orcid.org/0009-0007-5077-4062>

Кириченко Лалита Николаевна, младший научный сотрудник, Научно-инновационный центр Industry 4.0, г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: lalita17021996@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7069-5395>

Казамбаев Ильяс Маратулы, Научно-инновационный центр «Industry 4.0», Astana IT University, г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: i.kazambayev@astanait.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-0850-7490>

Командиров Евгений Витальевич, Магистр технических наук, инженер Автоматизированных систем управления и технического контроля ТОО «Атриум Строй Инвест», г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: yevgeniy.komandirov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3549-8393>

Кошкин Игорь Владимирович, кандидат технических наук, кафедра «Электроэнергетика» Костанайский региональный университет имени Ахмет Байтұрсынұлы, г. Костанай, 110000, Республика Казахстан, e-mail: elektroenergetika@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8637-3665>

Кислов Александр Петрович, кандидат технических наук, профессор кафедра «Электротехника и автоматизация», Торайғыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: kislovpsu@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4816-8008>

Каверин Владимир Викторович, кандидат технических наук, Исполняющий обязанности профессора, Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, г. Караганда, 100027, Республика Казахстан, e-mail: kaverinkz@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2021-7445>

Калиаскаров Нурбол Балтабаевич, PhD, зав.каф. Технологии систем связи, Карагандинский техниче-ский университет имени Абылкаса Сагинова, г. Караганда, 100000, Республика Казахстан, e-mail: n.kaliaskarov@ktu.edu.kz <https://orcid.org/0000-0003-3684-1488>

Құттыбай Нұржігіт Бақытұлы, PhD, И.о. доцент, Казахский Национальный университет имени аль-Фараби, физико-технический факультет, кафедра электроники и астрофизики, г. Алматы, 050038, Республика Казахстан, e-mail: Nurjigit.10.93@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5723-6642>

Казамбаев Ансар, студент, Факультет Энергетики, кафедра Электроэнергетики, Торайғыров университет, г. Павлодар Республика Казахстан, e-mail: kazambaevansar@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0005-5081-1623>

Каппарова Айнұр Аралбайқызы, докторант, Казахский Национальный университет имени аль-Фараби, факультет физико-технический, кафедра электроники и астрофизики, г. Алматы, 050047, Республика Казахстан, e-mail: kapparova_ainur3@kaznu.edu.kz, <https://orcid.org/0009-0008-8348-902X>

Котов Евгений Сергеевич, PhD, ст. преподаватель, Факультет энергетики, автоматики и телекоммуникаций, «Карагандинский технический, университет, имени Абылкаса Сагинова», г. Караганда, 100027, Республика Казахстан, e-mail: e.kotov@ktu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-2660-2010>

Крыкбаева Мариям, Торайғыров Университет г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: mgn017@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0001-7808-8650>

Лисицын Дмитрий Владимирович, ст. преподаватель, Факультет энергетики, автоматики и телекоммуникаций, «Карагандинский технический университет, имени Абылкаса Сагинова», г. Караганда, 100027, Республика Казахстан, e-mail: d.lisitsyn@ktu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-8800-9661>

Медетбек Арайлым, магистр цифрового государственного управления, Astana IT University, г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: Arailym.Medetbek@astanait.edu.kz, <https://orcid.org/0009-0001-7192-0360>

Мусаханова Салтанат Татарбековна, старший преподаватель, Факультет Архитектуры и строительства, Торайғыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: musaxanova.saltanat@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2249-7292>

Мусаева Жанна Кубашевна, кандидат биологических наук, доцент, «Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева, г. Алматы, 050013, Республика Казахстан, e-mail: zh.musaeva@aes.kz, <https://orcid.org/0000-0003-4371-6159>

Минажова Саулеш Аманбаевна, PhD, ассоц. профессор Satbayev University, г. Алматы, 050013, Республика Казахстан, email: s.minazhova@satbayev.university, <https://orcid.org/0000-0002-5461-2251>

Марат Нурбек Олжасұлы, магистрант, специальность «Электроэнергетика», кафедра «Энергетика», Satbayev University, г. Алматы, 050000, Республика Казахстан, e-mail: nurbek0355@gmail.com, ORCID:<https://orcid.org/0009-0000-3324-0260>

Мехтиев Али Джаванширович, кандидат технических наук, профессор, Проректор по науке и инновациям, Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, г. Караганда, 100026, Республика Казахстан, e-mail: bar-ton.kz@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2633-3976>

Мукашева Динара Талгатовна, магистр техники и технологий, инженер-метролог, Главный специалист Управления научно-исследовательской работы и обучения РГП «Казахстанский институт стандартизации и метрологии, г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: di-nara_north@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0002-9064-2711>

Маханова Махмуда Акпаровна, Кандидат экономических наук, старший преподаватель, кафедра теплоэнергетики, Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, г. Астана, 010011, Республика Казахстан, e-mail: murassayahat@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0006-7090-869X>,

Мендыбаев Сергазы Амергалиевич, кандидат технических наук, доцент, «Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, г. Астана, 010011, Республика Казахстан, e-mail: seke47@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0003-8221-4802>

Налибаев Нурғали Жаксылыкович, магистр, инженер ТОО «QazNRG Group», г. Алматы, 050060, Республика Казахстан, email: nurgali20091978@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5285-541X>

Нефтисов Александр Витальевич, PhD, ассоц. профессор, ректорат Академии физической культуры и массового спорта, Научно-инновационный центр «Industry 4.0», Astana IT University, г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: a_neftisov@apems.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-4079-2025>

Новожилов Александр Николаевич, доктор технических наук, профессор, кафедра «Электроэнергетика», Торайғыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: novozhilova_on@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7530-5034>

Новожилов Тимофей Александрович, кандидат технических наук, доцент, кафедра «Электроснабжение промышленных предприятий», Омский

государственный технический университет, г. Омск, 644050, Российская Федерация, e-mail: timokvey@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0293-7852>.

Нурсеитов Бакытжан Адилович, докторант, специальность «Электроэнергетика», кафедра «Энергетика», Satbayev University, г. Алматы, 050000, Республика Казахстан, e-mail: barakat_86@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0002-0714-9871>

Нурмаганбетова Гулим Сахитовна, PhD, исполняющая обязанности ассоц. профессора, Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, Энергетический факультет, г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: g_sahitovna@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9529-2477>

Нешина Елена Геннадьевна, кандидат технических наук, ассоц. профессор, заведующая кафедрой «Энергетические системы», «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова», г. Караганда, 100026, Республика Казахстан, e-mail: e.neshina@ktu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-8973-2958>

Наумов Владимир Викторович, PhD, постдокторант Факультет энергетики, Торайғыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: naumov.tou@outlook.com, <https://orcid.org/0009-0005-5837-4683>

Нарынбаев Дамир Серикович, магистр, исполнительный директор ассоциации KAZENERGY, г. Астана, 010006, Республика Казахстан, e-mail: d.narynbayev@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0004-9705-3420>

Орынбасар Саят Оразханұлы, докторант, Казахский Национальный университет имени аль-Фараби, физико-технический факультет, кафедра электроники и астрофизики, г. Алматы, 050038, Республика Казахстан, e-mail: Sayat.Orynassar@kaznu.edu.kz, <https://orcid.org/0009-0001-9124-2560>

Онгар Булбул, PhD, ассоц. профессор, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева (КазННТУ), г. Алматы, 050013, Республика Казахстан, e-mail: b.ongar@satbayev.university, <https://orcid.org/0000-0002-8333-8343>

Потемкина Елена Борисовна, ст. преподаватель, Факультет энергетики, автоматизации и телекоммуникаций, «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова», г. Караганда, 100027, Республика Казахстан, e-mail: e.potemkina@ktu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-1124-7995>

Парамонов Александр Михайлович, доктор технических наук, профессор, Омский Государственный Технический, университет г. Омск, 644050, Российская Федерация, e-mail: amparamonov@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0002-9271-2744>

Поддубный Александр Александрович, Лектор, кандидат технических наук, Агротехнический институт имени С. Садвакасова, Кокшетауский университет имени Ш. Уалиханова, г. Кокшетау, 020000, Республика Казахстан, e-mail: poddubnyy.alexandr.c@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0002-0096-1891>,

Поддубный Руслан Александрович, Лектор, Агротехнический институт имени С. Садвакасова, Кокшетауский университет имени Ш. Уалиханова, г. Кокшетау, 020000, Республика Казахстан, e-mail: poddubnyy-ruslan@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0000-2008-4377>

Сакитжанов Мархабат Шахмаранович, Старший преподаватель кафедры Энергообеспечения, электропривода и электротехники, Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева, г. Алматы, 050013, Республика Казахстан, e-mail: m.sakitzhanov@au.es.kz, <https://orcid.org/0000-0002-0955-8938>

Саканов Қуандық Темирович, кандидат технических наук, профессор, Факультет Архитектуры и строительства, Торайғыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: kuan_alter@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9959-5566>

Сакенов Балташ Канатович, Магистр технических наук, докторант кафедры «Электроэнергетика», Костанайский региональный университет имени Ахмет Байтұрсынұлы, г. Костанай, 110000, Республика Казахстан, e-mail: sakenovb996@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3457-0194>

Сабibolda Акежан Муратулы, PhD, руководитель научного проекта Института механики и машиноведения имени академика У. А. Жолдасбекова, г. Алматы, 050026, Республика Казахстан, e-mail: sabibolda98@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1186-7940>

Смайлов Нуржигит Куралбаевич, PhD, профессор кафедры «Электроника, телекоммуникации и космические технологии» Института автоматизации и информационных технологий, «Satbayev University», г. Алматы, 050013, Республика Казахстан, e-mail: n.smailov@satbayev.university, <https://orcid.org/0000-0002-7264-2390>

Сагындык Айгерим Бекенкызы, кандидат технических наук, профессор, Торайғыров университет, Факультет энергетики, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: aiko_90@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0376-2150>

Сейтбекова Айнагуль Манарбековна, руководитель проекта по грантовому финансированию «Жас ғалым», старший преподаватель, кафедра «Автоматизация и управление», Институт автоматизации и информационных технологий, Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека

Даукеева, г. Алматы, 050013, Республика Казахстан, e-mail: a.seitbekova@aes.kz, <https://orcid.org/0000-0002-2357-5937>

Сыбанбаева Дина Кадровна, докторант, Казахский Национальный университет имени аль-Фараби, физико-технический факультет, кафедра электроники и астрофизики, г. Алматы, 050038, Республика Казахстан, e-mail: dinasybanbaeva627@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0005-8713-2042>

Снопков Дмитрий, докторант, «Биология және экология» кафедрасы, Торайғыров университеті, г. Павлодар, 140008, Қазақстан Республикасы, snopkovdmitrii@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6907-9667>

Сейтенова Гайни Жумағалиевна, кандидат химических наук, ассоц. профессор, Объединение юридических лиц «Ассоциация производителей и потребителей нефтегазохимической продукции (Нефтегазохимическая Ассоциация)», г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: gainiseitenova@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6202-3951>

Танырбергенов Нариман Муратбекович, докторант, специальность 8D07103- Теплоэнергетика, Школа архитектуры, строительства и энергетики, Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, 070004, Республика Казахстан, e-mail: tanir_n@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6354-5428>

Талипов Олжас Манарбекович, PhD, профессор, декан факультета «Энергетики» Торайғыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: talipov1980@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8355-1769>

Тойгожинова Жанар Жумақановна, старший преподаватель кафедры Энергообеспечения, электропривода и электротехники, Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева, г. Алматы, 050013, Республика Казахстан, e-mail: zh.toygozhinova@aes.kz, <https://orcid.org/0000-0001-6597-4728>

Тулешов Аамандык Куатович, доктор технических наук, профессор, научный консультант научного проекта Института механики и машиноведения имени академика У. А. Жолдасбекова, член-корреспондент НАН РК, академик НИА РК, г. Алматы, 050026, Республика Казахстан, e-mail: aman_58@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9775-3049>

Тайсариева Кырмызы Нурлановна, PhD, ассоц. профессор, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева, Института автоматики и информационных технологий, г. Алматы, Республика Казахстан, 050013, e-mail: k.taisariyeva@satbayev.university, <https://orcid.org/0000-0002-1949-4288>

Таштай Ерлан, кандидат технических наук, профессор. Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева, Института автоматики и информационных технологий, г. Алматы,

Республика Казахстан, 050013, у. yashtay@satbayev.university, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0809-537X>

Уахит Наурызбай Асетулы, докторант, кафедра «Теплоэнергетика», Торайғыров университет, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан, e-mail: nauryzmc@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1626-2895>

Утепбергенов Ирбулат Туремуратович, доктор технических наук, профессор, кафедра «Автоматизация и управление, Институт автоматизации и информационных технологии, Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева, г. Алматы, 050013, Республика Казахстан, e-mail: i.utepbergenov@aes.kz, <https://orcid.org/0000-0003-0758-4849>

Утебаев Думан Нурмуханбетович, докторант, специальность «Электроэнергетика», Костанайский региональный университет имени А. Байтурсынова, г. Костанай, 110000, Республика Казахстан, e-mail: udn91@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0009-6129-8465>

Успанова Анастасия Игоревна, Магистр, старший преподаватель кафедра «Математики и физики», Костанайский региональный университет имени Ахмет Байтұрсынұлы, г. Костанай, 110000, Республика Казахстан, e-mail: Kamorrisweet1@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3484-8750>

Хидолда Еркин, кандидат технических наук, ассоц. профессор, кафедра «Энергетика», Satbayev University, Алматы, 050000, Республика Казахстан, e-mail: y.khidolda@satbayev.university, <https://orcid.org/0000-0001-7590-8134>

Цыба Юрий Александрович, доктор технических наук, профессор, кафедра Энергообеспечение и электропривода, Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева, г. Алматы, 050000, Республика Казахстан, e-mail: tsyba.46@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2688-7976>

Чныбаева Данна Максуткановна, Старший преподаватель, кафедра Энергообеспечение и электропривода, Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева, г. Алматы, 050000, Республика Казахстан, e-mail: danna_shyn@mail.ru, d.chnybaeva@aes.kz, <https://orcid.org/0000-0001-7297-0661>

Шоланов Корганбай Сагнаевич, доктор технических наук, профессор, Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, г. Астана, 010000, Республика Казахстан, e-mail: sholkor@gmail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2077-7883>

Шимпф Алексей, заведующий лабораториями, кафедра «Электротехники и автоматизации», факультет Энергетики, Торайғыров университет, г. Павлодар, 140000 Республика Казахстан, e-mail: shimpf5329@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4203-9117>

Эм Геннадий Аркадиевич, старший преподаватель кафедра автоматизации производственных процессов, магистр технических наук,

Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, г. Караганда, 100027, Республика Казахстан, e-mail: egaapp@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2639-0492>

Яманбекова Аяулым Конусбековна, PhD, ассоц.профессор, «Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева, г. Алматы, 050013, Республика Казахстан, e-mail: a.yamanbekova@aes.kz, <https://orcid.org/0000-0002-9670-5288>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Andrashko Yurii, PhD, Assistant professor, Department of System Analysis and Optimization Theory, Uzhhorod National University, Uzhhorod, 88000, Ukraine, e-mail: yurii.andrashko@uzhnu.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0003-2306-8377>

Amrenova Aigul Zhanuzakovna, senior lecturer, doctoral student of the educational program «Heat Power Engineering», Non-profit joint-stock company «Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after Gumarbek Daukeyev», Almaty, 050013, Republic of Kazakhstan, e-mail: a.amrenova@aes.kz, <https://orcid.org/0000-0001-8295-7153>

Akhambayev Ruslan, PhD student, Satbayev University, Almaty, 050013, Republic of Kazakhstan, email: r.akhambayev@satbayev.university, <https://orcid.org/0000-0002-1707-7042>

Alkina Aliya Daulet-khanovna, Associate Professor of the Department of Energy Systems, Candi-date of Technical Sciences, Karaganda technical university named A.Sagynov, Karaganda, 100008, Republic of Kazakhstan, e-mail: a.alkina@ktu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-4879-0593>

Abzhanova Laulasyn Kasylganovna, candidate of technical sciences, head of the Department of Automation and Control, Institute of Automation and Information Technology, University of Power Engineering and Telecommunications named after Gumarbek Daukeyev, Almaty, 050013, Republic of Kazakhstan, e-mail: l.abzhanova@aes.kz, <https://orcid.org/0000-0003-1781-269X>

Assainov Gibrat, Senior Lecturer at the Department of Power Supply, Phd, Faculty of Energy, Kazakh Agrotechnical Research University, named after S. Seifullin", Astana, 010000, Republic of Kazakhstan, e-mail: Asainovgibrat@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1330-5909>

Aldiarbek Nursulu Ermekkyzy, PhD Student, Kazakh National Research Technical University named after K. I. Satpayev (KazNITU), Almaty, 050013, Republic of Kazakhstan, e-mail: 981211400564-d@stud.satbayev.university, <https://orcid.org/0009-0009-2671-7943>

Anarbayev Alibek Yersainovich, senior teacher, Faculty of Energy, Toraighyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: alibek_anarbaev@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6890-8005>

Abdrakhmanov Bauyrzhan Tendikovich, Senior Lecturer, Toraighyrov University, Faculty of Energy, Pavlodar, 140008, The Republic of Kazakhstan, bauyrrymten@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0002-7817-1275>

Biloshchytskyi Andrii, Doctor of Technical Sciences, Professor, Vice-Rector for Science and Innovation, Astana IT University, Astana, 010000, The Republic of Kazakhstan, e-mail: a.b@astanait.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0001-9548-1959>

Biloshchytska Svitlana, Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Computational and Data Science, Astana IT University, Astana, 010000, The Republic of Kazakhstan, e-mail: bsv@astanait.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-0856-5474>

Bondartsev David Yu, PhD, professor of AUPET, Associate Professor HCC, Almaty University of Power Engineering and Telecommunications, named after G. Daukeev, Institute of Energy and Green Technologies, Almaty, 050013, Republic of Kazakhstan, e-mail: d.bondartsev@aes.kz, <https://orcid.org/0000-0001-8778-7851>

Baizholova Zhania Zhanatovna, Lecturer, Master's degree, Agrotechnical Institute named after S. Sadvakasov, 4 Kokshetau University named after Sh. Ualikhanov, Kokshetau, 020000, Republic of Kazakhstan, e-mail: zhania93@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0008-9535-1626>

Berdimurat Ainur, PhD, Leading Researcher, QazNRG Group LLP, Almaty, 050060, Republic of Kazakhstan, email: tananova-ainura@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0001-6425-8778>

Biloshchytskyi Yevhenii, Bachelor of Science in Software Engineering, Faculty of Computer Engineering, Astana IT University, Astana, 010000, Republic of Kazakhstan, e-mail: bya20102005@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0008-9285-3145>

Baltin Alisher, Senior Lecturer at the Department of Power Supply, Faculty of Energy, Kazakh Agrotechnical Research University, named after S. Seifullin", Astana, 010000, Republic of Kazakhstan, e-mail: aliserbaltin9@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4007-3987>

Berdaliev Ali, Engineer of Astana REC JSC, Astana, 010000, Republic of Kazakhstan, e-mail: aberdaliev292@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0000-5080-470X>

Berdibekov Abdissattar, Opabekovich, Senior Lecturer, Master of engineering and technology, Department of Power Engineering, Satbayev University, Almaty, 050000, Republic of Kazakhstan, e-mail: nurbek0355@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5943-432X>

Burambayev Yerassyl, Doctoral student at the Department of Power Supply, Faculty of Energy, Kazakh Agrotechnical Research University, named after S. Seifullin", Astana, 010000, Republic of Kazakhstan, e-mail: erasil.b@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0007-4564-2225>

Bekenov Yermek, director RTEL Telecom Almaty, Republic of Kazakhstan, 050013, e-mail: ybekenov@rtel.kz, <https://orcid.org/0009-0000-5201-0225>

Bolatbek Askhat, doctoral student, al-Farabi Kazakh National University, Faculty of Physics and Technology, department of electronics and astrophysics,

Almaty city, 050038, Republic of Kazakhstan, e-mail: bolatbekaskhat98@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0004-7613-5507>

Bedych Tatyana Vitalievna, candidate of technical sciences, Head of the Department of Energy and Engineering, Kostanay Engineering and Economic University named after Myrzhakypa Dulatova, Kostanay, 110000 Republic of Kazakhstan, e-mail: tbedych@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3642-8917>

Bizhanov Nurlan Ualikhanovich, doctoral student, in the specialty, "Electric power industry", Kostanay Regional University named after A. Baitursynov, Kostanay, 110000, Republic of Kazakhstan, e-mail: bizhanov_nurlan@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0044-6398>

Genbach Alexander A., Doctor of technical sciences, professor of AUPET, Almaty University of Power Engineering and Telecommunications, named after G. Daukeev, Institute of Energy and Green Technologies, Almaty, 050013, Republic of Kazakhstan, e-mail: a.genbach@aes.kz, <https://orcid.org/0009-0001-3819-4387>

Gluchshenko Tatiana Ivanovna, candidate of economic sciences, Assoc. Professor (Associate Professor), Kostanay Regional University named after A. Baitursynov, Kostanay, 110000, Republic of Kazakhstan, e-mail: tatyana194@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5536-6304>

Darimbayeva Nazira, Senior Lecturer of the Department of Power Supply, Electric Drive and Electrical Engineering, Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after Gumarbek Daukeyev, Almaty, 050013, Republic of Kazakhstan, e-mail: n.darimbaeva@aes.kz, <https://orcid.org/0009-0008-9787-2839>

Daich Leonid Israelevich, senior lecturer, Faculty of power engineering, automation and telecommunications, «Abylkas Saginov Karaganda Technical University», Karaganda, 100027, Republic of Kazakhstan, e-mail: l.daych@ktu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-9524-5857>

Dostiyarov Abai Mukhamediaruli, professor, doctor of technical sciences, Non-profit joint-stock company «Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after Gumarbek Daukeyev», Almaty, 050013, Republic of Kazakhstan, e-mail: a.dostiyarov@aes.kz, <https://orcid.org/0000-0002-6559-8598>

Druzhinin Valeriy Mikhailovich, PhD, Senior Lecturer at the Department of Energy, Karaganda Industrial University, Faculty of Energy, Transport and Management Systems, Temirtau, 101400, The Republic of Kazakhstan, e-mail: druzhinin_vm@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7261-8780>

Duisenbek Zhansaya Serikovna, PhD, associate professor, Department of Ecology and Management in Engineering, Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after Gumarbek Daukeyev, Almaty,

Astana, 050013, Republic of Kazakhstan, e-mail: zhaniko.adina@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7844-4240>

Dyussova Rizagul Muslimovna, Candidate of Technical Sciences, Postdoctoral Researcher of the "Mechanics and Oil and Gas Engineering" Department, Toraygirov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: rizagul.dyussova@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3083-5255>

Dubinets Natalia Alexandrovna, Master of Technical Sciences, Senior Lecturer, Toraigyrov University, Faculty of Energy, Pavlodar, 140008, The Republic of Kazakhstan, e-mail: dubinecsm@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0008-2186-1930>

Jakhmetov Assanali Master's, student, student in 7M06201 -«Telecommunication», Kazakh National Research Technical University named after K. I. Satbayev Institute of Automation and Information Technologies, Almaty, Republic of Kazakhstan, 050013, e-mail: assanaliyakhmetov@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0009-5754-8492>

Yesmakhanova Laura, PhD, Doctor of the Department of Automation and Telecommunications, Faculty of Technology, M.Kh.Dulaty Taraz University, Taraz, 080000, The Republic of Kazakhstan, e-mail: laura060780@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3308-9676>

Egzekova Anara Tlyulesovna, candidate of technical sciences, Assistant professor of ALiT, M. Tynyshpaev ALT University, Almaty, 050016, Republic of Kazakhstan, e-mail: a.egzekova@alt.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-7756-765X>

Егзекова Анара Тлюлесовна, кандидат технических наук, ассистент профессор АЛИТ, Университет АЛИТ имени М. Тынышпаева, г. Алматы, 050016, Республика Казахстан, e-mail: a.egzekova@alt.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-7756-765X>

Zhakupov Talgat Mukhamedkhasanovich, Candidate of Technical Sciences, Director of Green Thermal Energy LLP, Pavlodar, 140000, Republic of Kazakhstan, e-mail: sultan_200779@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9725-0262>

Zharkymbekova Makpal, Senior Lecturer of the Department of Power Supply, Electric Drive and Electrical Engineering, Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after Gumarbek Daukeyev, Almaty, 050013, Republic of Kazakhstan, e-mail: mak.zharkymbekova@aes.kz, <https://orcid.org/0000-0002-2285-8716>

Zhukenova Gulnar Abayevna, PhD, associate professor, Faculty of Architecture and Construction, Toraigyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: gulnara-home@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4096-5002>

Zhakanov Alibek Nurzhanovich, PhD student in the specialty "Production of building materials, products and structures", Faculty of Architecture and Civil

Engineering, L. N. Gumilyov Eurasian National University Astana, 10000, Republic of Kazakhstan, e-mail: azhakanov8@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8747-3788>

Жантлесева Асемгуль Бейсембаевна, и.о. ассоц. профессор (доцент), доктор PhD, Казахский государственный университет им. С.Сейфуллина, Республика Казахстан, г. Астана, 010008, e-mail: acbizh@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3730-0579>

Zhakupov Nazhmitden Berekeiliuly, senior lecturer of the Department of "Electric Power Supply" Kazakh Agrotechnical Research University named after S. Seifullin, Astana, 010000, The Republic of Kazakhstan e-mail: nazhmiden@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0005-7239-2095>

Zhakmanova Ekaterina Andreevna, Doctoral student, L. N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, 010000, Republic of Kazakhstan, e-mail: ekaterina.zakmanova1998@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0545-5912>

Zhalmagambetova Ultuar PhD, Associate Professor of the Department of Electrical Engineering and Automation, Faculty Power engineers, Toraigyrov university, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: ultuara@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2261-2222>

Ivanov Valery Anatolievich, PhD, Associate professor, Faculty of power engineering, automation and telecommunications, «Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, 100027, Republic of Kazakhstan, e-mail: V.ivanov@ktu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-2811-7908>

Issenov Zhanat Sansyzbaevich, senior teacher, Department of Electrical Engineering and Automation, Faculty of Energy, Toraigyrov University, Pavlodar, 140007, Republic of Kazakhstan, e-mail: issenov.zh@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2388-602X>

Issayeva Zhazira, Senior Lecturer at the Department of Power Supply, Phd, Faculty of Energy, Kazakh Agrotechnical Research University, named after S. Seifullin", Astana, 010000, Republic of Kazakhstan, e-mail: Zhozi_maggi@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8146-8366>

Issenov Sultanbek, Cand. Tech. Sci., Associated Professor, S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Astana, 010000, The Republic of Kazakhstan, e-mail: isenov_sultan@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4576-4621>

Imangazinova Dinara Kenzhetaevna, master, vice-rector for UMR, Ekibastuz engineering- technical institute named after academician K. Satpayev, Ekibastuz, 141208, Republic of Kazakhstan, e-mail: dinaraigul@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0773-1781>

Kuchanskyi Oleksandr, Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Computational and Data Science, Astana IT University, Astana,

010000, The Republic of Kazakhstan, e-mail: kuchanskyi.o@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-1277-8031>

Kustauletov Yrysbeke Sairanovich, doctoral student in the specialty 8D07103 – Thermal Power Engineering, School of Architecture, Construction and Energy, D. Serikbayev East Kazakhstan State Technical University, Oskemen, 070004, Republic of Kazakhstan, e-mail: kustauletov21@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0009-7554-759X>

Karmanov Amangeldy, PhD, Associate professor, Toraighyrov University, Pavlodar, 140008, The Republic of Kazakhstan, e-mail: aman270685@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7512-0275>

Kakabayev Nurbol Ayazbaevich, Head of the Department, Doctor of Philosophy (PhD), Associate Professor, Agrotechnical Institute named after S. Sadvakasov, Kokshetau University named after Sh.Ualikhanov, Kokshetau, 020000, Republic of Kazakhstan, e-mail: nurbol.ka@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3892-9590>

Kabdulina Anara Tasbolatovna, Lecturer, Master's degree, Agrotechnical Institute named after S. Sadvakasov, Kokshetau University named after Sh.Ualikhanov, Kokshetau, 020000, Republic of Kazakhstan, e-mail: AKabdylina@shokan.edu.kz, <https://orcid.org/0009-0007-5077-4062>

Kirichenko Lalita Nikolaevna, Junior Researcher at Scientific and Innovation Center Industry 4.0, Astana, 010000, The Republic of Kazakhstan, e-mail: lalita17021996@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7069-5395>

Kazambaev Ilyas Maratovich, Scientific and Innovation Center "Industry 4.0", Astana IT University, Astana, 010000, Republic of Kazakhstan, e-mail: i.kazambaev@astanait.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-0850-7490>

Komandirov Yevgeniy Vitalievich, Master of Technical Sciences, Engineer of Automated Control Systems and Technical Inspection, Atrium Sroy Invest LLP, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: yevgeniy.komandirov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3549-8393>

Koshkin Igor, candidate of technical sciences, department of "Electric Power Engineering" Kostanay Regional University named after Akhmet Baitursynuly, Kostanay, 110000, Republic of Kazakhstan, e-mail: elektroenergetika@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8637-3665>

Кислов Александр Петрович, candidate of technical sciences, professor of the Department of Electrical Engineering and Automation, Toraighyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: kislovpsu@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4816-8008>

Kaverin Vladimir Viktorovich, Acting Professor, Candidate of Technical Sciences, Abylbas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, 100027,

The Republic of Kazakhstan, e-mail: kaverinkz@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2021-7445>

Kaliaskarov Nurbol Baltabaevich, PhD, head of department The technology of communication systems, Kara-ganda technical university named A.Sagynov, Karaganda, 100000, Republic of Kazakhstan, e-mail: n.kaliaskarov@ktu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-3684-1488>

Kuttybay Nurzhigit, PhD, acting associate professor, Kazakh National University named after Al Farabi, Faculty of Physics and Technology, department of electronics and astrophysics, Almaty city, 050038, Republic of Kazakhstan, e-mail: Nurjigit.10.93@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5723-6642>

Kazambayev Ansar, Student, Energetic faculty, Electrical department, Toraighyrov University, Pavlodar, The Republic of Kazakhstan, e-mail: kazambaevansar@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0005-5081-1623>

Kapparova Ainur, doctoral student, al-Farabi Kazakh National University, Faculty of Physics and Technology, department of electronics and astrophysics, Almaty, 050047, Republic of Kazakhstan, e-mail: kapparova_ainur3@kaznu.edu.kz, <https://orcid.org/0009-0008-8348-902X>

Kotov Yevgeniy Sergeevich, PhD, senior lecturer, Faculty of power engineering, automation and telecommunications, «Abylbas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, 100027, Republic of Kazakhstan, e-mail: e.kotov@ktu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-2660-2010>

Krykbayeva Maryam, Toraighyrov University, Sity Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: mgn017@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0001-7808-8650>

Lissitsyn Dmitriy Vladivirovich, senior lecturer, Faculty of power engineering, automation and telecommunications, «Abylbas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, 100027, Republic of Kazakhstan, e-mail: d.lisitsyn@ktu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-8800-9661>

Medetbek Arailym, Master of Digital Public Administration Program, Astana IT University, Astana, 010000, The Republic of Kazakhstan, e-mail: Arailym.Medetbek@astanait.edu.kz, <https://orcid.org/0009-0001-7192-0360>

Mussakhanova Saltanat Tatarbekovna, Senior lecturer, Faculty of Architecture and Construction, Toraighyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: musaxanova.saltanat@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2249-7292>

Musayeva Zhanna Kubashevna, associate professor, candidate of biological sciences, Non-profit joint-stock company «Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after Gumarbek Daukeyev», Almaty, 050013, Republic of Kazakhstan, e-mail: zh.musaeva@aes.kz, <https://orcid.org/0000-0003-4371-6159>

Minazhova Saulesh, PhD, Associate Professor, Satbayev University, Almaty, 050013, Republic of Kazakhstan, email: s.minazhova@satbayev.university, <https://orcid.org/0000-0002-5461-2251>

Marat Nurbek Olzhasuly, Master's student in «Electric Power Engineering», Department of Power Engineering, Satbayev University, Almaty, 050000, Republic of Kazakhstan, e-mail: nurbek0355@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0000-3324-0260>

Mekhtiyev Ali Javan-shirovich, Candidate of Technical Sciences, Professor, Vice-Rector for Science and Innovation of Karaganda technical university named A. Sagynov, Karaganda, 100026, Republic of Kazakhstan, e-mail: barton.kz@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2633-3976>

Mukasheva Dinara T., Master of Engineering and Technology, Engineer-metrologist, Chief Specialist of the Department of Research and Training of the RSE "Kazakhstan Institute of Standardization and Metrology, Astana, 010000, Republic of Kazakhstan, e-mail: di-nara_north@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0002-9064-2711>

Mahmuda Makhanova Akparovna, Candidate of Economic Sciences, Senior Lecturer at the Department of Thermal Power Engineering, Kazakh Agrotechnical University named after S. Seifullina, Astana, 010011, Republic of Kazakhstan, e-mail: murassayahat, <https://orcid.org/0009-0006-7090-869X>

Mendibaev Sergazy Amergalievich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Kazakh Agrotechnical Research University named after S. Seifullin, Astana, 010011, The Republic of Kazakhstan, e-mail: seke47@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0003-8221-4802>

Nalibayev Nurgali, Master's degree, Engineer, QazNRG Group LLP, Almaty, 050060, Republic of Kazakhstan, email: nurgali20091978@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5285-541X>

Neftissov Alexandr, PhD, Associate Professor Rectorate, Academy of Physical Education and Mass Sports, Astana 010000, Kazakhstan, Research and innovation center "Industry 4.0", Astana IT University, Astana, Republic of Kazakhstan, 010000, e-mail: a_neftissov@apems.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-4079-2025>

Novozhilov Alexander Nikolaevich, Professor of the Department of "Electric Power Engineering", Doctor of Technical Sciences, professor (Kazakhstan), Toraighyrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: novozhilova_on@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7530-5034>

Novozhilov Timofey Alexandrovich, Associate Professor of the Department "Power Supply of Industrial Enterprises", Candidate of Technical Sciences, Omsk State Technical University, Omsk, 644000, Russian Federation, e-mail: timokvey@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0293-7852>.

Nurseitov Bahytzhan Adilovich, doctoral student in «Electric Power Engineering», Department of Power Engineering, Satbayev University, Almaty, 050000, Republic of Kazakhstan, e-mail: barakat_86@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0002-0714-9871>

Nurmaganbetova Gulim Sakhitovna, PhD, Acting Associate Professor, Kazakh Agrotechnical Research University named after S. Seifullin, Faculty of Energy, Astana, 010000, The Republic of Kazakhstan, e-mail: g_sahitovna@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9529-2477>

Neshina Yelena G., Head of the Department of Energy Systems, Candidate of Technical Sciences, Professor, Karaganda technical university named A. Sagynov, Karaganda, 100026, Republic of Kazakhstan, e-mail: e.neshina@ktu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-8973-2958>

Naumov Vladimir Viktorovich, PhD, postdoctoral fellow Toraighyrov University, Faculty of Energetics, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, <https://orcid.org/0009-0005-5837-4683>, e-mail: naumov.tou@outlook.com

Narynbayev Damir Serikovich, Master, Executive Director of the KAZENERGY Association, c., Astana, 010006, Republic of Kazakhstan, tel: , e-mail: d.narynbayev@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0004-9705-3420>

Orynbassar Sayat, doctoral student, al-Farabi Kazakh National University, Faculty of Physics and Technology, department of electronics and astrophysics, Almaty city, 050038, Republic of Kazakhstan, e-mail: Sayat.Orynbassar@kaznu.edu.kz, <https://orcid.org/0009-0001-9124-2560>

Ongar Bulbul, PhD, Associate Professor, Kazakh National Research Technical University named after K. I. Satpayev (KazNITU), Almaty, 050013, Republic of Kazakhstan, e-mail: b.ongar@satbayev.university, <https://orcid.org/0000-0002-8333-8343>

Potyomkina Yelena Borisovna, senior lecturer, Faculty of power engineering, automation and telecommunications, «Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, 100027, Republic of Kazakhstan, e-mail: e.potemkina@ktu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-1124-7995>

Paramonov Alexandr, Doctor of Technical Sciences, Professor, Omsk State Technical University Omsk, 644050, Russian Federation, e-mail: amparamonov@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0002-9271-2744>

Poddubnyy Alexandr Alexandrovich, Lecturer, Candidate of Technical Sciences. Agrotechnical Institute named after S. Sadvakasov, Kokshetau University named after Sh. Ualikhanov, Kokshetau, 020000, Republic of Kazakhstan, e-mail: poddubnyy.alexandr.c@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0002-0096-1891>

Poddubnyy Ruslan Alexandrovich, Lecturer, Agrotechnical Institute named after S. Sadvakasov, Kokshetau University named after Sh. Ualikhanov,

Kokshetau, 020000, Republic of Kazakhstan, e-mail: poddubnyy-ruslan@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0000-2008-4377>

Sakitzhanov Markhabat, Senior Lecturer of the Department of Power Supply, Electric Drive and Electrical Engineering, Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after Gumarbek Daukeyev, Almaty, 050013, Republic of Kazakhstan, e-mail: m.sakitzhanov@aes.kz, <https://orcid.org/0000-0002-0955-8938>

Сақанов Қуандық Темірұлы, Candidate of Technical Sciences, professor, Faculty of Architecture and Construction, Toraigrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: kuan_alter@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9959-5566>

Сакенов Балташ Канатович, PhD, student, Master of Technical Sciences, department of "Electric Power Engineering" Kostanay Regional University named after Akhmet Baitursynuly, Kostanay, 110000, Republic of Kazakhstan, e-mail: sakenovb996@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3457-0194>

Sabibolda Akezhan Muratuly, PhD, Scientific Project Leader at the Institute of Mechanics and Machine Science named after Academician U. A. Zholdasbekov, Almaty, 050026, Republic of Kazakhstan, <https://orcid.org/0000-0002-1186-7940>, e-mail: sabibolda98@gmail.com

Smailov Nurzhigit Kuralbayuly, PhD, Professor at the Department of Electronics, Telecommunications and Space Technologies, Institute of Automation and Information Technologies, «Satbayev University, Almaty, 050013, Republic of Kazakhstan, e-mail: n.smailov@satbayev.university, <https://orcid.org/0000-0002-7264-2390>

Sagyndyk Aigerim Bekenkyzy, Candidate of Technical Sciences, Professor, «Toraigrov University, Faculty of Energetics, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: aiko_90@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0376-2150>

Seitbekova Ainagul Manarbekovna, Project Manager of the grant financing project «Zhas galym», Senior Lecturer, Department of Automation and Control, Institute of Automation and Information Technology, Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after Gumarbek Daukeyev, Almaty, 050013, Republic of Kazakhstan, e-mail: a.seitbekova@aes.kz, <https://orcid.org/0000-0002-2357-5937>

Sybanbayeva Dina, doctoral student, Al-Farabi Kazakh National University, Faculty of Physics and Technology, department of electronics and astrophysics, Almaty city, 050038, Republic of Kazakhstan, e-mail: dinasybanbaeva627@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0005-8713-2042>

Snopkov Dmitriy, PhD student Department of Biology and Ecology Toraigrov university, Pavlodar, 140011, Kazakhstan Republicas, e-mail: snopkovdmitrii@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6907-9667>

Tanyrbergenov Nariman Muratbekovich, doctoral student in the specialty 8D07103 – Thermal Power Engineering, School of Architecture, Construction and Energy, D. Serikbayev East Kazakhstan State Technical University, Oskemen, 070004, Republic of Kazakhstan, e-mail: tanir_n@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6354-5428>

Talipov Olzhas Manarbekovich, PhD professor, dean of the Faculty of Energy, Toraigrov University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, e-mail: talipov1980@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8355-1769>

Toygozhinova Zhanar, Senior Lecturer of the Department of Power Supply, Electric Drive and Electrical Engineering, Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after Gumarbek Daukeyev, Almaty, 050013, Republic of Kazakhstan, e-mail: zh.toygozhinova@aes.kz, <https://orcid.org/0000-0001-6597-4728>

Tuleshov Amandyk Kuatovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Scientific Advisor of the Research Project at the Institute of Mechanics and Machine Science named after Academician U. A. Zholdasbekov, Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Kazakhstan, Academician of the National Engineering Academy of Kazakhstan, Almaty, 050026, Republic of Kazakhstan, e-mail: aman_58@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9775-3049>

Taissariyeva Kyrmyzy, PhD, associate professor, Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satbayev, Institute of Automation and Information Technologies, Almaty, Republic of Kazakhstan, 050013, e-mail: k.taisariyeva@satbayev.university, <https://orcid.org/0000-0002-1949-4288>

Tashtay Erlan candidate of Technical Sciences, Professor, Kazakh National Research Technical University named after K. I. Satbayev, Institute of Automation and Information Technologies, Almaty, Republic of Kazakhstan, 050013, e-mail: y.yashtay@satbayev.university, <https://orcid.org/0000-0002-0809-537X>

Uakhit Nauryzbay, Doctoral student of «Heat and Power Engineering» Department, Toraigrov University, Pavlodar, 140008, The Republic of Kazakhstan, e-mail: nauryzmc@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1626-2895>

Utepergenov Irbulat Turemuratovich, doctor of technical sciences, professor of Department of Automation and Control, Institute of Automation and Information Technology, University of Power Engineering and Telecommunications named after Gumarbek Daukeyev, Almaty, 050013, Republic of Kazakhstan, e-mail: i.utepbergenov@aes.kz, <https://orcid.org/0000-0003-0758-4849>

Utebayev Duman Nurmukhanbetovich, doctoral student, in the specialty, «Electric power industry», Kostanay Regional University named after A. Baitursynov, Kostanay, 110000, Republic of Kazakhstan, e-mail: udn91@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0009-6129-8465>

Uspanova Anastasia, Master, Senior Lecturer, Department of Mathematics and Physics, Kostanay Regional University named after Akhmet Baitursynuly, Kostanay, 110000, Republic of Kazakhstan, e-mail: Kamorrasweet1@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3484-8750>

Khidolda Yerkin, Associate Professor, Candidate of technical sciences, Department of Power Engineering, Satbayev University, Алматы, 050000, Republic of Kazakhstan, e-mail: y.khidolda@sa

Tsyba Yuri Alexandrovich, candidate of technical sciences, professor of the Department of Power supply and electric drive, Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after Gumarbek Daukeyev, Almaty, 050000, Republic of Kazakhstan, e-mail: tsyba.46@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2688-7976>

Chnybaeva Danna Maksutkanovna, Senior Lecturer of the Department of Power supply and electric drive, Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after Gumarbek Daukeyev, Almaty, 050000, Republic of Kazakhstan, e-mail: danna_shyn@mail.ru, d.chnybaeva@aes.kz, <https://orcid.org/0000-0001-7297-0661>

Sholanov Korganbai Sagnaevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Kazakh Agrotechnical Research University named after S. Seifullin, Astana, 010000, The Republic of Kazakhstan, e-mail: sholkor@gmail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2077-7883>

Shimpf Alexey, head of the laboratories of the Department of «Electrical Engineering and Automation», Faculty Power engineers, Faculty Power engineers, Toraighyrov university, Pavlodar, 140000, Republic of Kazakhstan, e-mail: shimpf5329@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4203-9117>

Em Gennadiy Arkadievich, Senior lecturer at the Department of Automation of Production Processes, Master of Technical Sciences, Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, 100027, The Republic of Kazakhstan, e-mail: egaapp@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2639-0492>

Yamanbekova Ayaulym Konusbekovna, associate professor, doctor of PhD, Non-profit joint-stock company «Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after Gumarbek Daukeyev», Almaty, 050013, Republic of Kazakhstan, e-mail: a.yamanbekova@aes.kz, <https://orcid.org/0000-0002-9670-5288>

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ В НАУЧНОМ ЖУРНАЛЕ («ВЕСТНИК ТОРАЙГЫРОВ УНИВЕРСИТЕТА», «КРАЕВЕДЕНИЕ»)

Редакционная коллегия просит авторов руководствоваться следующими правилами при подготовке статей для опубликования в журнале.

Научные статьи, представляемые в редакцию журнала должны быть оформлены согласно базовым издательским стандартам по оформлению статей в соответствии с ГОСТ 7.5-98 «Журналы, сборники, информационные издания. Издательское оформление публикуемых материалов», пристатейных библиографических списков в соответствии с ГОСТ 7.1-2003 «Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления».

***В номер допускается не более одной рукописи от одного автора либо того же автора в составе коллектива соавторов.**

***Количество соавторов одной статьи не более 5.**

***Степень оригинальности статьи должна составлять не менее 60 %.**

***Направляемые статьи не должны быть ранее опубликованы, не допускается последующее опубликование в других журналах, в том числе переводы на другие языки.**

***Решение о принятии рукописи к опубликованию принимается после проведения процедуры рецензирования.**

***Рецензирование проводится конфиденциально («двустороннее слепое рецензирование»), автору не сообщается имя рецензента, а рецензенту – имя автора статьи.**

***Статьи отправлять вместе с квитанцией об оплате. Стоимость публикации в журнале за страницу 1000 (одна тысяча) тенге, включая статьи магистрантов и докторантов в соавторстве с лицами с ученой степенью.**

*** Оплата за статью не возвращается в случае, если статья отклонена антиплагиатом или рецензентом. Автор может повторно отправить статью на антиплагиат или рецензирования 1 раз.**

Статьи должны быть оформлены в строгом соответствии со следующими правилами:

– В журналы принимаются статьи по всем научным направлениям, набранные на компьютере, напечатанные на одной стороне листа с полями 30 мм со всех сторон листа, электронный носитель со всеми материалами в текстовом редакторе «Microsoft Office Word (97, 2000, 2007, 2010) для WINDOWS».

– Общий объем статьи, включая аннотации, литературу, таблицы, рисунки и математические формулы не должен превышать **12 страниц** печатного текста. *Текст статьи: кегль – 14 пунктов, гарнитура – Times New Roman (для русского, английского и немецкого языков), KZ Times New Roman (для казахского языка).*

Структура научной статьи включает название, аннотации, ключевые слова, основные положения, введение, материалы и методы, результаты и обсуждение, заключение, выводы, информацию о финансировании (при наличии), список литературы (используемых источников) к каждой статье, включая романизированный (транслитерированный латинским алфавитом) вариант написания источников на кириллице (на казахском и русском языках) *см. ГОСТ 7.79–2000 (ИСО 9–95) Правила транслитерации кирилловского письма латинским алфавитом.*

Статья должна содержать:

1 **МРНТИ** (Межгосударственный рубрикатор научной технической информации);

2 **DOI** – после МРНТИ в верхнем правом углу (присваивается и заполняется редакцией журнала);

3 **Фамилия, имя, отчество (полностью)** автора (-ов) – на казахском, русском и английском языках (*жирным шрифтом, по центру*), **главного автора пометить символом (*)**;

4 **Ученая степень, ученое звание**;

5 **Аффилиация** (факультет или иное структурное подразделение, организация (место работы (учебы)), город, почтовый индекс, страна) – на казахском, русском и английском языках;

6 **E-mail**;

7 **Название статьи** должно отражать содержание статьи, тематику и результаты проведенного научного исследования. В название статьи необходимо вложить информативность, привлекательность и уникальность (*не более 12 слов, прописными буквами, жирным шрифтом, по центру, на трех языках: русский, казахский, английский либо немецкий*);

8 **Аннотация** – краткая характеристика назначения, содержания, вида, формы и других особенностей статьи. Должна отражать основные и ценные, по мнению автора, этапы, объекты, их признаки и выводы проведенного исследования. Дается на казахском, русском и английском либо немецком языках (*рекомендуемый объем аннотации – не менее 150, не более 300 слов, курсив, нежирным шрифтом, кегль – 12 пунктов, абзацный отступ слева и справа 1 см, см. образец*);

9 **Ключевые слова** – набор слов, отражающих содержание текста в терминах объекта, научной отрасли и методов исследования (*оформляются*

на трех языках: русский, казахский, английский либо немецкий; кегль – 12 пунктов, курсив, отступ слева-справа – 1 см.). Рекомендуемое количество ключевых слов – 5-8, количество слов внутри ключевой фразы – не более 3. Задаются в порядке их значимости, т.е. самое важное ключевое слово статьи должно быть первым в списке (см. образец);

10 **Основной текст статьи** излагается в определенной последовательности его частей, включает в себя:

- **Введение / Kіріспе / Introduction** (*абзац 1 см по левому краю, жирными буквами, кегль – 14 пунктов*). Обоснование выбора темы; актуальность темы или проблемы. Актуальность темы определяется общим интересом к изученности данного объекта, но отсутствием исчерпывающих ответов на имеющиеся вопросы, она доказывается теоретической или практической значимостью темы.

- **Материалы и методы** (*абзац 1 см по левому краю, жирными буквами, кегль – 14 пунктов*). Должны состоять из описания материалов и хода работы, а также полного описания использованных методов.

- **Результаты и обсуждение** (*абзац 1 см по левому краю, жирными буквами, кегль – 14 пунктов*). Приводится анализ и обсуждение полученных вами результатов исследования. Приводятся выводы по полученным в ходе исследования результатам, раскрывается основная суть. И это один из самых важных разделов статьи. В нем необходимо провести анализ результатов своей работы и обсуждение соответствующих результатов в сравнении с предыдущими работами, анализами и выводами.

- **Информацию о финансировании (при наличии)** (*абзац 1 см по левому краю, жирными буквами, кегль – 14 пунктов*).

- **Выводы / Қорытынды / Conclusion** (*абзац 1 см по левому краю, жирными буквами, кегль – 14 пунктов*).

Выводы – обобщение и подведение итогов работы на данном этапе; подтверждение истинности выдвигаемого утверждения, высказанного автором, и заключение автора об изменении научного знания с учетом полученных результатов. Выводы не должны быть абстрактными, они должны быть использованы для обобщения результатов исследования в той или иной научной области, с описанием предложений или возможностей дальнейшей работы.

- **Список использованных источников / Пайдаланған деректер тізімі / References** (*жирными буквами, кегль – 14 пунктов, в центре*) включает в себя:

Статья и список использованных источников должны быть оформлены в соответствии с ГОСТ 7.5-98; ГОСТ 7.1-2003 (*см. образец*).

Очередность источников определяется следующим образом: сначала последовательные ссылки, т.е. источники на которые вы ссылаетесь по очередности в самой статье. Затем дополнительные источники, на которых нет

ссылок, т.е. источники, которые не имели место в статье, но рекомендованы вами читателям для ознакомления, как смежные работы, проводимые параллельно. Объем не менее 10 не более чем 20 наименований (ссылки и примечания в статье обозначаются сквозной нумерацией и заключаются в квадратные скобки). В случае наличия в списке использованных источников работ, представленных на кириллице, необходимо представить список литературы в двух вариантах: первый – в оригинале, второй – романизированный (транслитерация латинским алфавитом) вариант написания источников на кириллице (на казахском и русском языках) см. ГОСТ 7.79–2000 (ИСО 9–95) Правила транслитерации кирилловского письма латинским алфавитом.

Романизированный список литературы должен выглядеть следующим образом:

автор(-ы) (транслитерация) → название статьи в транслитерированном варианте → [перевод названия статьи на английский язык в квадратных скобках] → название казахоязычного либо русскоязычного источника (транслитерация, либо английское название – если есть) → выходные данные с обозначениями на английском языке.

11 **Иллюстрации, перечень рисунков и подрисуночные надписи к ним** представляют по тексту статьи. В электронной версии рисунки и иллюстрации представляются в формате TIF или JPG с разрешением не менее 300 dpi.

12 **Математические формулы** должны быть набраны в Microsoft Equation Editor (каждая формула – один объект).

На отдельной странице (после статьи)

В электронном варианте приводятся **полные почтовые адреса, номера служебного и домашнего телефонов, e-mail** (номер телефона для связи редакции с авторами, не публикуются);

Сведения об авторах

На казахском языке	На русском языке	На английском языке
Фамилия Имя Отчество (полностью)		
Должность, ученая степень, звание		
Организация		
Город		
Индекс		
Страна		
E-mail		
Телефон		

Информация для авторов

Для статей, публикуемых в Научном журнале Торайғыров университет. Химико-биологическая серия, требуется экспертное заключение.

Редакция не занимается литературной и стилистической обработкой статьи.

Если статья отклонена антиплагиатом или рецензентом статья возвращается автору на доработку. Автор может повторно отправить статью на антиплагиат или рецензирования 1 раз. За содержание статьи несет ответственность Автор.

Статьи, оформленные с нарушением требований, к публикации не принимаются и возвращаются авторам.

Датой поступления статьи считается дата получения редакцией ее окончательного варианта.

Статьи публикуются по мере поступления.

Периодичность издания журналов – четыре раза в год (ежеквартально)

Сроки подачи статьи:

- первый квартал до 10 февраля;
- второй квартал до 10 мая;
- третий квартал до 10 августа;
- четвертый квартал до 10 ноября.

Статьи отправлять вместе с квитанцией об оплате. Стоимость публикации в журнале за страницу 1000 (одна тысяча) тенге, включая статьи магистрантов и докторантов в соавторстве с лицами с ученой степенью.

Статью (электронную версию, и квитанции об оплате) следует направлять на сайт: www.vestnik-energy.tou.edu.kz. Для подачи статьи на публикацию необходимо пройти регистрацию на сайте.

140008, Республика Казахстан, г. Павлодар, ул. Ломова, 64,

НАО «Торайғыров университет»,

Издательство «Toraighyrov University», каб. 137.

Тел. 8 (7182) 67-36-69, (внутр. 1147).

E-mail: kereku@tou.edu.kz

Наши реквизиты:

НАО «Торайғыров университет» РНН 451800030073 БИН 990140004654	НАО «Торайғыров университет» РНН 451800030073 БИН 990140004654	Приложение kaspi.kz Платежи – Образование – Оплата за ВУЗы – Заполнение все графы (в графе Факультет укажите «За публикацию в научном журнале, название журнала и серии»)
АО «Jýsan Bank» ИИК KZ57998FTB00 00003310 БИК TSEKZK A Кбе 16 Код 16 КНП 861	АО «Народный Банк Казахстана» ИИК KZ156010241000003308 БИК HSBKZKX Кбе 16 Код 16 КНП 861	

ОБРАЗЕЦ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

МРНТИ 14.37.27

DOI xxxxxxxxxxxxxx

***С. К. Антикеева**

Торайғыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар

**ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ
КОМПЕТЕНЦИЙ СОЦИАЛЬНЫХ РАБОТНИКОВ
ЧЕРЕЗ КУРСЫ ПОВЫШЕНИЯ КВАЛИФИКАЦИИ**

В данной статье представлена теоретическая модель формирования личностных и профессиональных компетенций социальных работников через курсы повышения квалификации, которая разработана в рамках докторской диссертации «Формирование личностных и профессиональных компетенций социальных работников через курсы повышения квалификации». В статье приводятся педагогические аспекты самого процесса моделирования, перечислены этапы педагогического моделирования. Представлены методологический, процессуальный (технологический) и инструментальный уровни модели, ее цель, мониторинг сформированности искомых компетенций, а также результат. В модели показаны компетентностный, личностно-ориентированный и практико-ориентированный педагогические подходы, закономерности, принципы, условия формирования выбранных компетенций; описаны этапы реализации процесса формирования, уровни сформированности личностных и профессиональных компетенций. В разделе практической подготовки предлагается интерактивная работа в системе слушатель-преподаватель-группа, подразумевающая личное участие каждого специалиста, а также открытие первого в нашей стране Республиканского общественного объединения «Национальный альянс профессиональных социальных работников». Данная модель подразумевает под собой дальнейшее совершенствование и самостоятельное развитие личностных и профессиональных компетенций социальных работников. Это позволяет увидеть в модели эффективность реализации курсов повышения квалификации, формы, методы и средства работы.

Ключевые слова: теоретическая модель, компетенции, повышение квалификации, социальные работники.

Введение

Социальная работа – относительно новая для нашей страны профессия. Поэтому обучение социальных работников на современной стадии не характеризуется наличием достаточно разработанных образовательных стандартов, которые находили бы выражение в формулировке педагогических целей, в содержании, технологиях учебного процесса.

Продолжение текста публикуемого материала

Материалы и методы

Теоретический анализ научной психолого-педагогической и специальной литературы по проблеме исследования; анализ законодательных и нормативных документов по открытию общественных объединений; анализ содержания программ курсов повышения квалификации социальных работников; моделирование; анализ и обобщение педагогического опыта; опросные методы (беседа, анкетирование, интервьюирование); наблюдение; анализ продуктов деятельности специалистов; эксперимент, методы математической статистики по обработке экспериментальных данных.

Продолжение текста публикуемого материала

Результаты и обсуждение

Чтобы понять объективные закономерности, лежащие в основе процесса формирования и развития личностных и профессиональных компетенций социальных работников через курсы повышения квалификации, необходимо четко представлять себе их модель.

Продолжение текста публикуемого материала

Выводы

Таким образом, на основании вышеизложенного можно сделать вывод о том, что теоретическая модель формирования личностных и профессиональных компетенций социальных работников через курсы повышения квалификации содержит три уровня ее реализации.

Продолжение текста публикуемого материала

Список использованных источников

- 1 **Дахин, А. Н.** Педагогическое моделирование : сущность, эффективность и неопределенность [Текст] // Педагогика. – 2003. – № 4. – С. 22.
- 2 **Кузнецова, А. Г.** Развитие методологии системного подхода в отечественной педагогике : монография [Текст]. – Хабаровск : Изд-во ХК ИППК ПК, 2001. – 152 с.
- 3 **Каропа, Г. Н.** Системный подход к экологическому образованию и воспитанию (На материале сельских школ) [Текст]. – Минск, 1994. – 212 с.
- 4 **Штофф, В. А.** Роль моделей в познании [Текст] – Л. : ЛГУ, 1963. – 128 с.

5 **Таубаева, Ш.** Методология и методика дидактического исследования : учебное пособие [Текст]. – Алматы : Казак университети, 2015. – 246 с.

6 **Дахин, А. Н.** Моделирование компетентности участников открытого образования [Текст]. – М. : НИИ школьных технологий 2009. – 290 с.

7 **Дахин, А. Н.** Моделирование в педагогике [Текст] // Идеи и идеалы. – 2010. – № 1(3). – Т. 2 – С. 11–20.

8 **Дахин, А. Н.** Педагогическое моделирование : монография [Текст]. – Новосибирск : Изд-во НИПКиПРО, 2005. – 230 с.

9 **Аубакирова, С. Д.** Формирование деонтологической готовности будущих педагогов к работе в условиях инклюзивного образования : дисс. на соиск. степ. д-ра филос. (PhD) по 6D010300 – Педагогика и психология [Текст] – Павлодар, 2017. – 162 с.

10 **Арын, Е. М., Пфейфер, Н. Э., Бурдина, Е. И.** Теоретические аспекты профессиональной подготовки педагога XXI века : учеб. пособие [Текст]. – Павлодар : ПГУ им. С. Торайгырова; СПб. : ГАФКиС им. П. Ф. Лесгафта, 2005. – 270 с.

References

1 **Dahin, A. N.** Pedagogicheskoe modelirovanie : suschnost, effektivnost i neopredelennost [Pedagogical modeling : essence, effectiveness, and uncertainty] [Text]. In Pedagogiy. – 2003. – № 4. – P. 22.

2 **Kuznetsova, A. G.** Razvitiye metodologii sistemnogo podhoda v otechestvennoi pedagogike [Development of the system approach methodology in Russian pedagogy : monograph] [Text]. – Khabarovsk : Izd-vo KhK IPPK PK, 2001. – 152 p.

3 **Karopa, G. N.** Sistemnyi podhod k ekologicheskomu obrazovaniyu i vospitaniyu (Na materiale selskih shkol) [The systematic approach to environmental education and upbringing (Based on the material of rural schools)] [Text] – Minsk, 1994. – 212 p.

4 **Shtoff, V. A.** Rol modelei v poznanii [The role of models in cognition] [Text] – L. : LGU, 1963. – 128 p.

5 **Taubayeva, Sh.** Metodologiya i metodika didakticheskogo issledovaniya : uchebnoe posobie [Methodology and methods of educational research : a tutorial] [Text] – Almaty : Kazak University, 2015. – 246 p. c.

6 **Dahin, A. N.** Modelirovanie kompetentnosti uchastnikov otkrytogo obrazovaniya [Modeling the competence of open education participants] [Text] – Moscow : NII shkolnyh tehnologii, 2009. – 290 p.

7 **Dahin, A. N.** Modelirovanie v pedagogike [Modeling in pedagogy] [Text]. In Idei i idealy. – 2010. – № 1(3). – Т. 2 – P. 11–20.

8 **Dahin, A. N.** Pedagogicheskoe modelirovanie : monographia [Pedagogical modeling : monograph] [Text]. – Novosibirsk : Izd-vo NIPKiPRO, 2005. – 230 p.

9 **Aubakirova, S. D.** Formirovaniye deontologicheskoi gotovnosti buduschih pedagogov k rabote v usloviyah inklusivnogo obrazovaniya : dissertaciya na soiskanie stepeni doctora filosofii (PhD) po specialnosti 6D010300 – Pedagogika i psihologiya. [Formation of deontological readiness of future teachers to work in inclusive education : dissertation for the degree of doctor of philosophy (PhD) in the specialty 6D010300- Pedagogy and psychology] [Text] – Pavlodar, 2017. – 162 p.

10 **Aryn, E. M., Pfeifer, N. E., Burdina, E. I.** Teoreticheskie aspekty professionalnoi podgotovki pedagoga XXI veka : ucheb. posobie [Theoretical aspects of professional training of a teacher of the XXI century : textbook] [Text] – Pavlodar : PGU im. S. Toraigyrov PSU; St.Petersburg. : GAFKiS im. P. F. Lesgafta, 2005. – 270 p.

С. К. Антикеева

Торайғыров университет, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.

БІЛІКТІЛІКТІ АРТТЫРУ КУРСТАРЫ АРҚЫЛЫ ӘЛЕУМЕТТІК ҚЫЗМЕТКЕРЛЕРДІҢ КҮЗІРЕТТІЛІКТЕРІН ҚАЛЫПТАСТЫРУДЫҢ ТЕОРИЯЛЫҚ МОДЕЛІ

Бұл мақалада «Әлеуметтік қызметкерлердің біліктілігін арттыру курстары арқылы тұлғалық және кәсіби құзіреттіліктерін қалыптастыру» докторлық диссертация шеңберінде әзірленген біліктілікті арттыру курстары арқылы әлеуметтік қызметкерлердің тұлғалық және кәсіби құзіреттілігін қалыптастырудың теориялық моделі ұсынылған. Мақалада модельдеу процесінің педагогикалық аспектілері, педагогикалық модельдеудің кезеңдері келтірілген. Модельдің әдіснамалық, процессуалдық (технологиялық) және аспаптық деңгейлері, оның мақсаты, қажетті құзіреттердің қалыптасу мониторингі, сондай-ақ нәтижесі ұсынылған. Модельде құзіреттілікке, тұлғаға бағытталған және практикаға бағытталған педагогикалық тәсілдер, таңдалған құзіреттерді қалыптастыру заңдылықтары, қағидаттары, шарттары көрсетілген; қалыптасу процесін іске асыру кезеңдері, жеке және кәсіби құзіреттердің қалыптасу деңгейлері сипатталған. Практикалық дайындық бөлімінде тыңдаушы-оқытушы-топ жүйесінде интерактивті жұмыс ұсынылады, ол әр маманның жеке қатысуын, сондай-ақ елімізде алғашқы «кәсіби әлеуметтік қызметкерлердің ұлттық альянсы» республикалық қоғамдық бірлестігінің ашылуын білдіреді. Бұл модель

әлеуметтік қызметкерлердің жеке және кәсіби құзыреттерін одан әрі жетілдіруді және тәуелсіз дамытуды білдіреді. Бұл модельде біліктілікті арттыру курстарын іске асырудың тиімділігін, жұмыс нысандары, әдістері мен құралдарын көруге мүмкіндік береді.

Кілтті сөздер: теориялық модель, құзыреттілік, біліктілікті арттыру, әлеуметтік қызметкерлер.

S. K. Antikeyeva

Toraighyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar

THEORETICAL MODEL OF FORMATION COMPETENCIES OF SOCIAL WORKERS THROUGH PROFESSIONAL DEVELOPMENT COURSES

This article presents a theoretical model for the formation of personal and professional competencies of social workers through advanced training courses, which was developed in the framework of the doctoral dissertation «Formation of personal and professional competencies of social workers through advanced training courses». The article presents the pedagogical aspects of the modeling process itself, and lists the stages of pedagogical modeling. The methodological, procedural (technological) and instrumental levels of the model, its purpose, monitoring the formation of the required competencies, as well as the result are presented. The model shows competence-based, personality-oriented and practice-oriented pedagogical approaches, patterns, principles, conditions for the formation of selected competencies; describes the stages of the formation process, the levels of formation of personal and professional competencies. The practical training section offers interactive work in the listener-teacher-group system, which implies the personal participation of each specialist, as well as the opening of the first Republican public Association in our country, the national Alliance of professional social workers. This model implies further improvement and independent development of personal and professional competencies of social workers. This allows you to see in the model the effectiveness of the implementation of advanced training courses, forms, methods and means of work.

Keywords: theoretical model, competencies, professional development, social workers.

Сведения об авторах

На казахском языке	На русском языке	На английском языке
Антикеева Самал Канатовна «Педагогика және психология» мамандығы бойынша докторант «Торайғыров университеті» КЕАҚ, Гуманитарлық және әлеуметтік ғылымдар факультеті, Павлодар, 140008, Қазақстан Республикасы, samal_antikeyeva@mail.ru, 8-000-000-00-00	Антикеева Самал Канатовна докторант по специальности «Педагогика и психология» НАО «Торайғыров университет», Факультет гуманитарных и социальных наук, Павлодар, 140008, Республика Казахстан, samal_antikeyeva@mail.ru, 8-000-000-00-00	Samal Kanatovna Antikeyeva doctoral student in «Pedagogy and psychology» «Toraighyrov University» NCJSC, Faculty of Humanities and Social Sciences, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan, samal_antikeyeva@mail.ru, 8-000-000-00-00

**ПУБЛИКАЦИОННАЯ ЭТИКА НАУЧНЫХ ЖУРНАЛОВ
«ВЕСТНИК ТОРАЙГЫРОВ УНИВЕРСИТЕТА»,
«КРАЕВЕДЕНИЕ», «НАУКА И ТЕХНИКА КАЗАХСТАНА»**

Редакционная коллегия журналов «Вестник Торайғыров университет», «Краеведение» и «Наука и техника Казахстана» в своей работе придерживается международных стандартов по этике научных публикаций и учитывает информационные сайты ведущих международных журналов.

Редакционная коллегия журнала, а также лица, участвующие в издательском процессе в целях обеспечения высокого качества научных публикаций, во избежание недобросовестной практики в публикационной деятельности (использование недостоверных сведений, изготовление данных, плагиат и др.), обеспечения общественного признания научных достижений обязаны соблюдать этические нормы и стандарты, принятые международным сообществом и предпринимать все разумные меры для предотвращения таких нарушений.

Редакционная коллегия ни в коем случае не поощряет неправомерное поведение (плагиат, манипуляция, фальсификация) и приложит все силы для предотвращения наступления подобных случаев. В случае, если редакционной коллегии станет известно о любых неправомерных действиях в отношении опубликованной статьи в журнале или в случае отрицательного результата экспертизы редколлегии статья отклоняется от публикации.

Редакционная коллегия не должна раскрывать информацию о принятых к опубликованию рукописей третьим лицам, не являющимся рецензентами, потенциальными рецензентами, членами редакционной коллегии, работниками типографии. Неопубликованные данные, полученные из рукописей, не должны использоваться в личных исследовательских целях без письменного разрешения автора.

Ответственность экспертов (рецензентов)

Рецензенты должны давать объективные суждения и указывать на соответствующие опубликованные работы, которые еще не цитируются. К рецензируемым статьям следует обращаться конфиденциально. Рецензенты будут выбраны таким образом, чтобы не было конфликта интересов в отношении исследования, авторов и / или спонсоров исследования.

Ответственность авторов

Ответственность за содержание работы несет автор. Авторы обязаны вносить исправления, пояснения, опровержения и извинения, если такие имеются.

Автор не должен представлять статью, идентичную ранее опубликованной в другом журнале. В частности, не принимаются переводы на английский либо немецкий язык статей, уже опубликованных на другом языке.

В случае обнаружения в рукописи статьи существенных ошибок автор должен сообщить об этом редактору раздела до момента подписи в печать оригинал-макета номера журнала. В противном случае автор должен за свой счет исправить все критические замечания.

Направляя статью в журнал, автор осознаёт указанную степень персональной ответственности, что отражается в письменном обращении в редакционную коллегию Журнала.

Теруге 09.09.2025 ж. жіберілді. Басуға 30.09.2025 ж. қол қойылды.

Электронды баспа

29.9 Mb RAM

Шартты баспа табағы 22,2. Таралымы 300 дана. Бағасы келісім бойынша.

Компьютерде беттеген: А. К. Мыржикова

Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Тапсырыс № 4447

Сдано в набор 09.09.2025 г. Подписано в печать 30.09.2025 г.

Электронное издание

29.9 Mb RAM

Усл. печ. л. 22,2. Тираж 300 экз. Цена договорная.

Компьютерная верстка: А. К. Мыржикова

Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Заказ № 4447

«Toraighyrov University» баспасынан басылып шығарылған

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

«Toraighyrov University» баспасы

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

67-36-69

E-mail: kereku@tou.edu.kz

www.vestnik-energy.tou.edu.kz