

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 Торайгыров 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 алқасы – Редакционная коллегия

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

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 Торайгыров университета» обязательна

© Торайгыров университет

МАЗМҰНЫ 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 әзірлеу	6
Амренова А. Ж., Достияров А. М., Яманбекова А. К., Мусеева Ж. К.	
Исследование конструкций и характеристик горелок водогрейных котлов малой и средней мощности	21
Балтин А. Т., Исаева Ж. Р., Бердалиев А. Д.	
Использование и влияние ВИЭ в повышении энергоэффективности распределительных сетей напряжением 20 кв	32
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	50
Biloshchytskyi A., Kuchanskyi O., Andrashko Y., Biloshchytska S., Medetbek A.	
Predictability of mining wastewater pollution based on fractal time series analysis	64
Генбач А. А., Бондарцев Д. Ю.	
Охлаждение лопаток перспективных паровых турбин кипящими жидкостями	75
Глуценко Т. И., Бедыч Т. В., Бижанов Н. У., Утебаев Д. Н., Имангазинова Д. К.	
Исследование автономной системы теплоснабжения с применением карбонового теплонагревателя	92
Darimbayeva N., Sakitzhanov M., Toygozhinova Zh., Zharkymbekova M.	
Kazakhstan's energy transformation: now 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 риформинга	126
Жалмагамбетова У., Крыкбаева М., Шимпф А., Казамбаев А., Снопков Д.	
Эффективное решение передачи данных по радиоканалу для автономных станций экологического мониторинга	139
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., Жантлесова А. Б., Есмаханова Л. Н.	
Жерге тұйықталу тогын 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., Танырбергенев Н. М., Талипов О. М., Жакупов Т. М.	
Шетелде және Қазақстанда қамыстан, мысыққұйрықтан энергия алулы 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
Omarov 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	320
Сәбиболда Ә. М., Смайлов Н. Қ., Тулешов А. К., Сағындық А. Б., Наумов В. В. Радиосигналдарды спектрлік-корреляциялық өңдеу міндеттері үшін математикалық модельдеу	355
Поддубный А. А., Какабаев Н. А., Кабдулина А. Т., Байжолова Ж. Ж., Поддубный Р. А. Исследование процесса переноса теплоты при движении газо-жидкостных систем в вертикальных трубах	346
Тайсариева К. Н., Таштай Е., Бекенов Е., Джахметов А. 5G желілерінде IoT трафигінің өткізу қабілетін болжау үшін LSTM алгоритмін қолдануды зерттеу	360
Утепбергенов И. Т., Сейтбекова А. М., Абжанова Л. К. Применение искусственного интеллекта для перехода к проактивной модели управления тепловыми сетями	374
Чныбаева Д. М., Цыба Ю. А. Wireless hART технологиясы бойынша магистральдық құбырдағы газдың ағын бақылау	387
Шоланов К. С., Асаинов Г. Ж., Жакипов Н. Б., Буранбаев Е. А., Марковскии В. П. Исследование и разработка автоматизированной системы генерирования и аккумуляирования электроэнергии парусной ветровой электростанции	402
Авторлар туралы ақпарат	
Сведения об авторах	
Information about the authors	414
Авторларға арналған ережелер	
Правила для авторов	
Rules for authors	452
Жарияланым этикасы	
Публикационная этика	
Publication ethics	464

<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.;

³Ф. 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/м^3);

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.

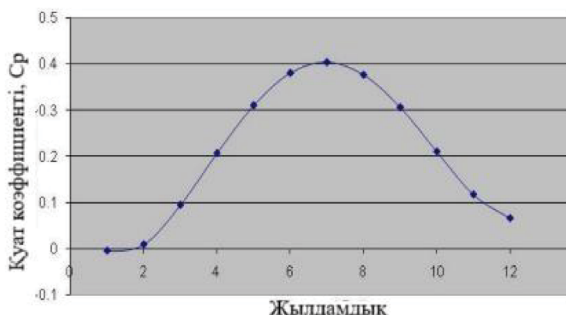
Қуат коэффициентінің сандық жуықтауы [3] арқылы берілген:

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

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.



1-сурет – 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 айналу 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

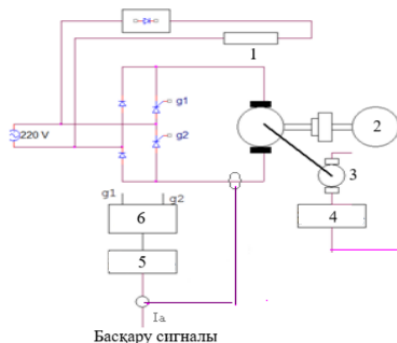
№	Параметрлер	Мәні
1	Жел жылдамдығы	5–12 м/с аралығында
2	Қалақ ұзындығы	1,2 м
3	Номинал қуат	500 Вт
4	Тұрақты ток моторы	220 В, 2,5 А

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:

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 Вальнда 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:

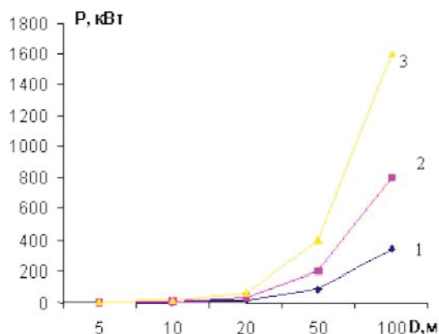
$$N_{\text{БЭУ}} = 4,81 \cdot 10^4 \cdot D^2 \cdot v^3 \cdot \xi \cdot \eta_n, \text{ кВт} \quad (8)$$

немесе жел қондырғысының жел қамтитын бетінің аудан бірлігіне

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

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.

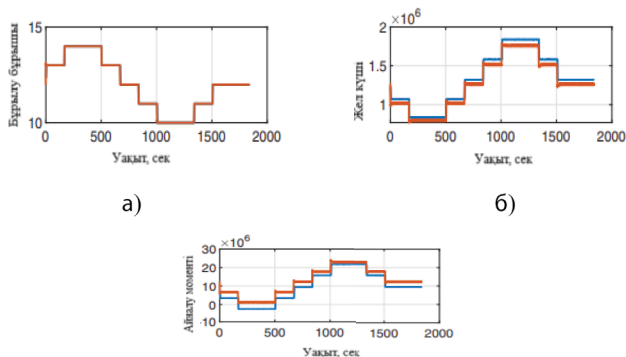
Ал жел жылдамдығы артқан сайын қуат тезірек өседі. Қисықтар арасындағы айырмашылық өте үлкен болады:

- 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 $1 \times 106 - 2 \times 106$ Н болады. Уақыт бойынша күшейіп, кейін қайта азаяды.

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

Астыңғы жақ график (в) – турбинаның білігіне әсер ететін айналдыру моменті. Диапазон: шамамен $5 \times 106 - 25 \times 106$ 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 айналу 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 айналу 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. 1–2March, 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 kinematicheskikh 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.

*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 воспроизводить 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.

*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.

Keywords. wind turbine, emulator, simulation, technical condition monitoring, diagnostics, wind energy.

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