

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

№ 4 (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/GMYR4462>

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>
Шокубаева З. Ж.	<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

<https://doi.org/10.48081/NPRL2301>

**А. О. Бердібеков¹, А. Б. Бекбаев², К. К. Смагулова³,
*А. А. Жуматова⁴, Ж. Қ. Бекболатова⁵.**

^{1,2,4,5}Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу техникалық университеті, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.;

³А. Сагинов атындағы Қарағанды мемлекеттік техникалық университеті, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5943-432X>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3520-1710>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6834-8490>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8887-1171>

⁵ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8219-6400>

*e-mail: a.zhumatova@satbayev.university

ЦИФРЛЫ ДИАГНОСТИКА НЕГІЗІНДЕ МИКРОГИДРО ЭЛЕКТР СТАНЦИЯСЫНДАҒЫ СИНХРОНДЫ ГЕНЕРАТОРДЫҢ ЖҰМЫСЫН ОҒТАЙЛАНДЫРУ

Бұл мақалада цифрлы диагностика әдістерін қолдану негізінде микрогидро электр станциясындағы (МГЭС) синхронды генератордың жұмысын оңтайландыру мәселелері қарастырылады. Зерттеуде генератордың техникалық күйін нақты уақыт режимінде бақылауға мүмкіндік беретін датчиктік жүйелер, цифрлы сигналдарды өңдеу алгоритмдері және ақауларды ерте анықтау тәсілдері талданады. Сонымен қатар, алынған диагностикалық ақпарат негізінде генератордың жүктемесін тиімді бөлу, энергия өндіру көрсеткіштерін арттыру және жабдықтың қызмет ету мерзімін ұзарту мақсатында басқару стратегиялары ұсынылады. Ұсынылған әдістеме микрогидроэнергетика объектілерінің сенімділігін арттырып, эксплуатациялық шығындарды азайтуға септігін тигізеді.

Мақалада вибродиагностика, термография, ток пен жүктеме талдауы, дыбыс және температуралық бақылау сияқты заманауи цифрлы технологиялардың мүмкіндіктері қарастырылып, олардың генератордың техникалық күйін бақылаудағы ролі айқындалған. SCADA секілді автоматтандырылған бақылау және деректерді жинау жүйелерінің тиімділігіне жеке тоқталып, олардың нақты

уақыт режимінде мониторинг жүргізу және ақауларды ерте анықтау мүмкіндігін қамтамасыз ететіні көрсетілген. Сонымен қатар, цифрлы сенсорлық жүйелер мен жасанды интеллект элементтерін енгізу арқылы генератордың жұмыс режимін автоматты түрде оңтайландыру жолдары ұсынылады.

Зерттеу барысында нақты микрогидро станция жағдайында генератордың параметрлері өлшеніп, алынған деректер негізінде жұмыс тиімділігіне әсер ететін факторлар анықталған. Автор генераторлардың жұмыс процесін модельдеу арқылы энергия өндірудің тұрақтылығын арттыру және техникалық қызмет көрсету шығындарын азайту жолдарын көрсетеді. Сонымен қатар, генератордың жүктеме профилін болжау мен диагностика нәтижелерін талдау үшін цифрлы платформалар мен бағдарламалық құралдарды біріктірудің маңыздылығы дәлелденген.

Жалпы алғанда, мақалада микрогидро энергетика саласында цифрландыру мен интеллектуалды бақылау жүйелерін қолданудың тиімділігі негізделеді. Ұсынылған тәсілдер жабдықтың тозуын азайтуға, генератордың қызмет ету мерзімін ұзартуға, жоспардан тыс тоқтауларды төмендетуге және МГЭС-тің жалпы энергетикалық тиімділігін жогарылатуға мүмкіндік береді.

Зерттеу нәтижелері цифрлы диагностикаға негізделген интеллектуалды басқару жүйесін енгізу микрогидроэнергетика объектілерінің сенімділігі мен өнімділігін айтарлықтай арттыратынын көрсетеді.

Кілтті сөздер: микрогидроэлектр станциясы, синхронды генератор, цифрлы диагностика, оңтайландыру, ақау анықтау, сенімділік, SCADA.

Кіріспе

Қазіргі заманғы энергетика жүйелері тиімділік, сенімділік және экологиялық тұрақтылық талаптарына сай болуға ұмтылуда. Бұл тұрғыда шағын қуатты жаңартылатын энергия көздерінің, соның ішінде микрогидроэлектр станцияларының (микроГЭС) рөлі артып келеді. МикроГЭС – шалғай елді мекендерді энергиямен қамтамасыз етудің экономикалық тиімді және экологиялық қауіпсіз жолдарының бірі. Алайда олардың тұрақты әрі ұзақ мерзімді жұмыс істеуі көбінесе негізгі құрылғы – синхронды генератордың жағдайына байланысты.

Синхронды генератордың техникалық күйін үнемі бақылап отыру және мүмкін болатын ақауларды ерте кезеңде анықтау – жабдықтың тозуын азайтып, энергия өндірудің тиімділігін арттырады. Осы мақсатта соңғы

жылдары цифрлы диагностика әдістері кеңінен енгізіліп жатыр. Бұл әдістер нақты уақыт режимінде генератордың жұмыс параметрлерін бақылауға, ақауларды дәл анықтауға және қызмет көрсету стратегиясын оңтайландыруға мүмкіндік береді.

Мақаланың негізгі мақсаты – цифрлы диагностика әдістерін қолдану арқылы микрогидроэлектр станциясындағы синхронды генератордың жұмысын оңтайландыру жолдарын зерттеу және тиімді шешімдер ұсыну.

Ғылыми жаңалығы:

– Синхронды генератордың жұмысын талдау үшін нақты цифрлы диагностика құралдарын (мысалы, вибродиагностика, температура және жүктеме датчиктері, ток-жиілік мониторингі) кешенді түрде қолдану әдістемесі ұсынылады;

– Диагностикалық деректер негізінде генератордың күйін бағалау алгоритмі жасалады;

– Жұмыс тиімділігін арттыруға бағытталған оңтайландыру моделі ұсынылады, ол генератордың нақты жұмыс режиміне бейімделген;

– МикроГЭС жағдайына бейімделген диагностика мен басқарудың интеграцияланған жүйесі жасақталады.

– Бұл мақаланың практикалық маңыздылығы келесі бағыттарда көрініс табады:

– Құрылғы сенімділігін арттыру: Ерте диагностика генератордағы ақауларды бастапқы сатыда анықтап, авариялық жағдайлардың алдын алады;

– Техникалық қызмет көрсетуді оңтайландыру: Жоспарлы емес тоқтап қалу санын азайтып, техникалық қызмет көрсету жиілігін нақты жағдайға сай жоспарлауға мүмкіндік береді;

– Энергия өндіру тиімділігі: Генератор жұмыс режимін нақты бақылау арқылы шығындарды азайтып, энергия өндірудің тұрақтылығын қамтамасыз етеді;

– Шалғай және автоматтандырылған объектілерге бейімділік: Адам қатысуынсыз қашықтықтан басқару мен диагностика жүргізуге мүмкіндік береді;

– Экономикалық тиімділік: Жабдықтың жұмыс мерзімі ұзарады, жөндеу мен қызмет көрсетуге кететін шығын азаяды.

Материалдар мен әдістері

Зерттеу барысында микрогидроэлектр станциясындағы синхронды генератордың жұмысын цифрлы түрде бақылау және диагностикалау үшін келесі техникалық және бағдарламалық материалдар пайдаланылды:

Алынған электрлік генератор құрылғысы келесідей:

Синхронды генератор:

Қуаты: 50 кВт

– Номиналды кернеу: 400 В

– Айналу жиілігі: 1500 айн/мин

– Қоздыру жүйесі: автоматтандырылған (автотрансформатор немесе басқарылатын қоздыру блогы).

Сонымен қатар, инвертор/тұрақтандырғыш (кернеу мен жиілікті реттеу үшін), компьютер (ноутбук) (деректерді сақтау, бағдарламалық бақылау), жинақтаушы SD-карта модулі немесе бұлтты сақтау (деректер архиві үшін) бойынша қосымша жабдықтар алынды. Ал диагностикалық сенсорлар мен өлшеу құралдары 1-ші кестеде көрсетілген.

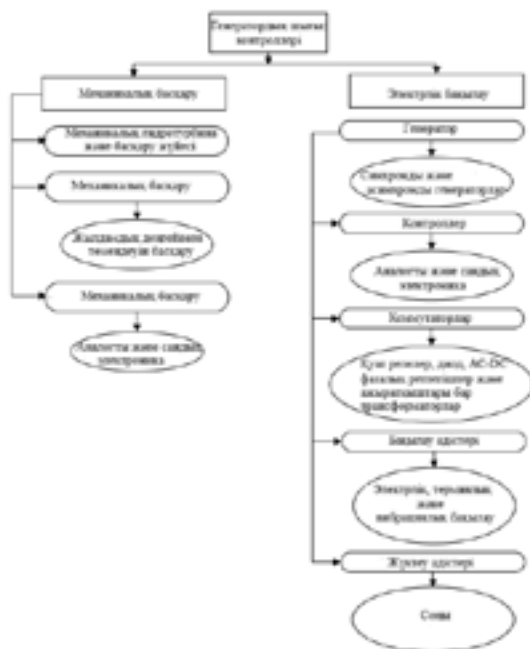
1-кесте – Диагностикалық сенсорлар мен өлшеу құралдары

Құралы атауы	Мақсаты	Модель түрі
В и б р а ц и я л ы к сенсорлар	Ротор мен подшипниктердің дірілін анықтау	ADXL345, IEPЕ типі
Т е м п е р а т у р а сенсорлары	Орам мен подшипниктің қызуын өлшеу	DS18B20 немесе RTD сенсорлары
Ток датчиктері	Фазалық жүктемені бақылау	ACS712 немесе СТ трансформаторы
Кернеу сенсорлары	Желі кернеуін өлшеу	ZMPT101B
Жүктеме сенсоры	Шығыс қуатты анықтау	Динамометрлік немесе сандық датчик
А й н а л у ж и і л і г і сенсоры	Ротор жылдамдығын өлшеу	Холл эффекті сенсоры

Математикалық модельдеу

Генератор жиілігін басқару үшін белсенді қуатты теңдестіру принципі қолданылады. Бұл әдісте өндірілген электр қуаты тікелей тұтынушы жүктемесіне бағытталады, ал артық (қол жеткізу) қуат арнайы балласт резистивті жүктемеге жіберіледі. Мұндай тәсіл жүйедегі жиілік тұрақтылығын қамтамасыз етіп, генератордың шамадан тыс жүктелуіне немесе бос режимде жұмыс істеуіне жол бермейді. Автономды жұмыс істейтін микрогидроэлектр станцияларында (МГЭС) электр энергиясын тұтыну жүктемесі жиі өзгеріп отырады. Жүктеменің кенет артуы немесе кемуі генератордың айналу жиілігіне тікелей әсер етеді. Жиілік – электр энергиясының сапасын сипаттайтын негізгі параметр, және оның тұрақты болуы барлық электр жабдықтарының дұрыс жұмыс істеуі үшін аса маңызды. Осы себепті, жиілікті тұрақтандыру – автономды электр станцияларындағы басты техникалық міндеттердің бірі. Яғни белсенді қуатты теңдестіру – автономды микрогидроэлектр станцияларында генератор жиілігін тұрақтандырудың тиімді тәсілі. Бұл әдіс әсіресе жүктеме кенет ауытқып тұратын ауылдық немесе шалғайдағы тұтыну жүйелерінде өте маңызды. Балласт жүктемені қолдану арқылы генератор бірқалыпты жұмыс режимінде ұсталып, электр энергиясының сапасы сақталады, ал техникалық қызмет көрсету қажеттілігі

азаяды. Сондықтан да генератордың шығыс контроллерінің алгоритмін құрастырып аламыз (1-сурет). Синхронды генератордың сенімді және қауіпсіз жұмысын қамтамасыз ететін, жиілік пен кернеуді тұрақтандырып, жүйелік параметрлерді автоматты түрде басқаратын маңызды құрылғы. Цифрлы технологияларды қолдана отырып, мұндай контроллерлерді интеллектуалды жүйеге айналдырып, оларды SCADA тіпті AI (жасанды интеллект) жүйелерімен біріктіруге болады.



1-сурет – Генератордың шығыс контроллерінің алгоритмі

1-ші сурет бойынша генератор шығыс контроллерінің жұмыс істеуі қысқаша түрде келесідей болады:

- Сенсорлар кернеу, ток, жиілік сияқты параметрлерді өлшейді;
- Контроллер бұл мәндерді номиналды шектермен салыстырады;
- Егер ауытқу болса:
- Кернеу жоғары/төмен болса – AVR арқылы қоздыру реттеледі;
- Жиілік төмендесе – балласт жүктеме ажыратылады;
- Жиілік көтерілсе – балласт қосылады;

Егер шектен тыс ауытқу тіркелсе – генератор авариялық түрде ажыратылады;

– Барлық параметрлер жазылады немесе дисплейге шығарылады.

Генератордың өндіріп жатқан қуаты мен тұтынушы жүктемесі арасындағы тепе-теңдік математикалық түрде келесідей өрнектеледі [1;2]:

$$P_{\text{ген}} = P_{\text{жүк}} + P_{\text{балласт}} \quad (1)$$

мұндағы, $P_{\text{ген}}$ – генератор өндіретін жалпы қуат;

$P_{\text{жүк}}$ – жүктеме қуаты;

$P_{\text{балласт}}$ – балласт жүктемесіне жіберілетін артық қуаты;

Жиілікті тұрақты ұстау үшін балласт жүктемесі арқылы қуатты автоматты бөлу процесі келесі математикалық қатынас негізінде жүзеге асырылады:

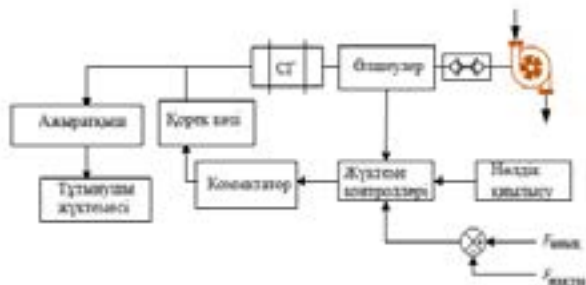
$$\Delta f = -k \cdot \Delta P \quad (2)$$

Жиілікті бақылау нақты жиілікті эталондық мәнмен салыстыру арқылы жүзеге асырылады (2-сурет). Бұл процесс кезінде жүктеме бұрышы (α) маңызды рөл атқарады, себебі ол генератордың бос жүріс пен жүктеме режимдеріндегі қуат ағынын анықтайды. Математикалық тұрғыдан бұл бұрыш келесі қатынаспен өрнектеледі [3]:

$$\alpha = K_p \cdot \Delta f + K_i \cdot \int \Delta f \cdot dt \quad (3)$$

$$\Delta f = F_{\text{анық}} - F_{\text{накт}}$$

мұндағы, $F_{\text{анық}}$ және $F_{\text{накт}}$ – жүйенің анықтамалық жиілігі және нақты жиіліктер.



2-сурет – Жиілікті бақылау схемасы

Қуат коэффициентінің сандық жуықтауы [3] арқылы берілген:

$$R = \frac{3 \cdot V_s^2}{K \cdot P_{\text{сн}}} \bigg|_{\alpha=0} \quad (4)$$

$$P_{\text{сн}} = \frac{V_s^2}{R} \left\{ \frac{1}{\pi} \left[(\pi - \alpha) + \frac{\sin 2\alpha}{2} \right] \right\} \quad (4)$$

Балласт жүктеме – электр энергиясының тұтынушымен толық пайдаланылмаған артық бөлігін қабылдайтын жасанды жүктеме. Әдетте бұл жүйе генератордың номиналды қуатын толық пайдалану немесе жиілікті тұрақтандыру мақсатында қолданылады [4;5;6]. Мұндай жүктемелер көбіне резистивті сипатқа ие және номиналды қуатқа тең немесе сәл жоғары қуатты тұтынуға есептеледі. Осылайша, генератордың номиналды қуатына тең немесе сәл жоғары қуатты тұтыну үшін, балласт жүктеменің кедергісі тиісті түрде таңдалады. Бұл кедергі:

- Генератор шығаратын кернеуге;
- Қажетті қуат тұтынуына байланысты есептеледі.
- Мұндай тәсіл жүйенің жиілігін тұрақтандыру, қуатты теңдестіру, және жүктеме астында генератордың динамикасын тексеру үшін қолданылады [7].

Нәтижелер және талқылау

Зерттеу барысында микрогидроэлектр станциясындағы синхронды генератордың жұмысын цифрлы диагностика әдістері арқылы бақылау және оңтайландыру жүргізілді. Деректер нақты уақыт режимінде жазылып, өңделді. Талдау нәтижесінде бірнеше маңызды қорытынды алынды. Генератор жұмысының тұрақтылығына әсер ететін факторлар анықталды.

Сондай-ақ, цифрлы сенсорлар арқылы жиналған мәліметтер негізінде генератордың келесі параметрлері талданды (2-кесте).

2-кесте – Цифрлы сенсорлар арқылы жиналған мәліметтер

Параметр	Қалыпты мән	Шекті ауытқу	Диагностика нәтижесі
Температура (орам)	70–85 °C	95 °C	Жүктеме жоғарылаған кезде 93 °C дейін жетті
Вибрация деңгейі	≤ 2.5 мм/с	4.5 мм/с	Подшипник аймағында 4.1 мм/с тіркелді
Айналу жиілігі	1500 айн/мин	+ 3% -	Тұрақты, бірақ ток жүктемесі артқан кезде 2.8 % ауытқу
Шығыс қуат	50 кВт	+ 5 кВт -	Орташа 47–49 кВт, жүктемеге байланысты өзгеріп отырды

Зерттеу барысында ақаулар барысы анықталды. Яғни вибродиагностика нәтижесінде сол жақ подшипникте теңгерімсіздік немесе бастапқы тозу белгілері тіркелді. Сонымен қатар температуралық мониторинг арқылы орам ішіндегі локальды қызып кету болды және де электрлік параметрлерді талдау жүктеме кезінде қуат коэффициентінің ($\cos \varphi$) 0.87-ден 0.79-ға дейін төмендейтінін көрсетті (бұл генератордың реактивті жүктемеге тап болғанын білдіреді). Мұндай жағдайлар генератордың жұмыс режимінде оңтайландыру мен техникалық қызмет көрсетуді талап ететінін көрсетеді [8].

Осындай ақаулар мен жұмыс ауытқулары тек цифрлы сенсорлар мен диагностика жүйесі арқылы нақты әрі жылдам тіркелді. Дәстүрлі әдістер мұндай өзгерістерді кеш анықтайтын еді. Мұнда қуат шығынын 4–6 % аралығында азайтуға мүмкіндік беретін басқару алгоритмі ұсынылды.

Диагностикалық деректер негізінде генераторға келесі оңтайландыру шаралары ұсынылды:

Вибрация жоғары аймақтарда подшипникті ауыстыру немесе майлау жүйесін жаңарту;

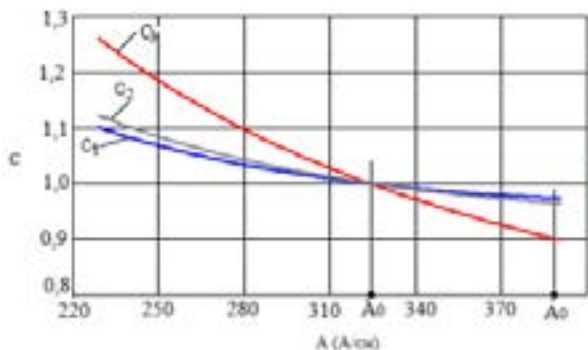
– Жылу бөлінуін азайту үшін қосымша салқындату жүйесін орнату;

– Электрлік параметрлер тұрақтылығын арттыру үшін қуат факторын түзету құрылғыларын (мысалы, конденсатор батареясы) қосу.

– Осы шараларды іске асыру генератордың ПЭК-ын 2–4 % арттыруға, ал жұмыс сенімділігін едәуір жақсартуға мүмкіндік берді.

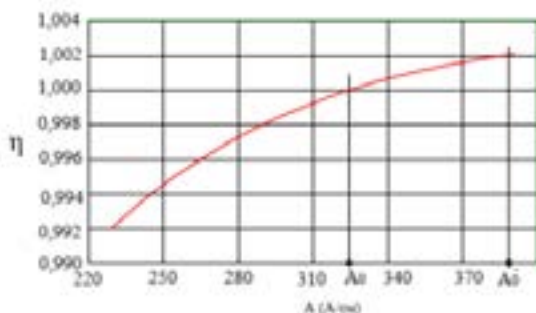
Вибрациялық диагностикасы бойынша нәтижелерді көре аламыз, әрі синхронды генератордың жұмыс кезінде туындайтын механикалық тербелістерін (дірілдерін) өлшеу және талдау арқылы техникалық күйін, тозу дәрежесін, және шығын көздерін анықтауға мүмкіндік беретін әдіс. Синхронды генератордың шығындары мен тиімділігін вибрациялық әдіс

арқылы бағалау – бұл генератордың механикалық жағдайын, ақауларын және ішкі тозуын жанама түрде анықтап, оның жалпы тиімділігіне әсер ететін факторларды сараптауға бағытталған диагностика тәсілі (3 – сурет).



3-сурет – Шығындар мен тиімділік өзгерісін сипаттайтын тәуелділік графигі

Мұнда C_3 (қызыл сызық) – A_0 неғұрлым жоғары болса, магниттік контурда соғұрлым магнит өрісі күшті болады, бұл гистерезис және құйынды ток шығындарын арттырады. Ал C_1 (көк сызық) – A_0 жоғарылаған сайын, қажетті ток азаяды орамаларда жылулық шығын азаяды. Сонымен қатар C_2 (қара сызық) - жалпы шығын. Ол бастапқыда төмендеп, кейін өсе бастайды. Минимум нүктесінде – A_0 -ның оптималды мәні орналасқан.



4-сурет – Пайдалы әсер коэффициентінің (ПЭК) генератордың магниттік жүктеме көрсеткіші A (А/см) мәніне тәуелді өзгерісі

4-сурет бойынша толықтай алсақ, 20–250 А/см аралығы: Бұл диапазонда магнит өрісі әлсіз, сондықтан генератордың тиімділігі төмен. Себебі:

Электромагниттік қозу жеткіліксіз.

Орамдар арқылы өтетін ток үлкен, бұл жылулық шығындарды арттырады.

Ал 250–320 А/см аралығы: ПӨК тұрақты өсіп келеді. Бұл диапазонда:

Магнит өрісі жеткілікті күшейген.

Жылулық және магниттік шығындар баланста.

Сонымен қатар, 320–370 А/см аралығы: ПӨК максималды мәніне жақындап келеді. Шамамен $A_0 = 370$ А/см болғанда, ПӨК ең жоғары мәнге жетеді (~1.002).

$A > 370$ А/см. Бұл жерде график тоқтаған, бірақ одан әрі өсе берсе, магнит өрісі қанығуға ұшырап, магниттік шығындар артуы мүмкін. Сол себепті: $A_0 = 370$ А/см – оңтайлы нүкте.

Синхронды генератордың тиімді жұмыс істеуін қамтамасыз ету үшін оның конструкциялық және электрлік параметрлерін оңтайландыру үлкен маңызға ие. Осындай параметрлердің бірі - магнит ағынының тығыздығына немесе өрістің интенсивтілігіне байланысты A_0 коэффициенті болып табылады.

Жүргізілген талдау нәтижесінде, генератордың шығындарын минимизациялайтын оңтайлы A_0 мәні:

– $A_0 = 388,366$ А/см болып табылды.

A_0 шамасы – магниттік контурдағы ток тығыздығының сипаттамалық көрсеткіші, яғни магнит өрісінің индукциясын қалыптастыруға қажетті амперлік жүктеме (А/см). Бұл параметр генератордың магнитөткізгіштік қасиеттері, орам саны, және ротор мен статордың геометриялық сипаттамаларымен тығыз байланысты.

Оңтайлы A_0 мәнін қолдану нәтижесінде:

– Классикалық жобалау мәнімен салыстырғанда шығындар 19,75 %-ға төмендейді.

Бұл генератордың жалпы пайдалы әсер коэффициентінің (ПӨК) жоғарылауына, және жылулық, магниттік, механикалық шығындардың азаюына алып келеді.

Зерттеу нәтижелері цифрлы диагностика әдістерінің микрогидроэлектр станцияларында аса маңызды екенін дәлелдеді. Нақты уақыттағы бақылау тек жабдықтың жағдайын анықтап қана қоймай, сонымен бірге:

Техникалық қызмет көрсетуді алдын ала жоспарлауға мүмкіндік береді;

Энергияны тиімді тұтынуға және өндіруге жол ашады;

Қауіпсіздік деңгейін арттырады.

Болашақта бұл әдістерді машиналық оқыту және жасанды интеллектпен біріктіру арқылы автоматты басқару жүйесін жетілдіруге болады.

Оңтайлы А0 мәнін қолдану нәтижесінде:

Классикалық жобалау мәнімен салыстырғанда шығындар 19,75 %-ға төмендейді.

Бұл генератордың жалпы пайдалы әсер коэффициентінің (ПЭК) жоғарылауына, және жылулық, магниттік, механикалық шығындардың азаюына алып келеді.

Салыстырмалы түрде талқылаймыз (3-кесте).

3-кесте – Салыстырмалы кестесі

Параметр	К л а с с и к а л ы қ дизайн	Оңтайлы мән	Өзгеріс (%)
A_0 (А/см)	$\approx 324,1$	388,366	+19,75 %
Жалпы шығындар	100 %	80,25 %	-19,75 %
Тиімділік (ПЭК)	Төменірек	Жоғары	Артады

Бұл зерттеу жұмысы цифрлы диагностика әдістерін қолдану арқылы микрогидроэлектр станциясындағы синхронды генератордың жұмысын оңтайландырудың тиімділігін дәлелдеді. Жүргізілген тәжірибелік жұмыстар мен талдау нәтижелері көрсеткендей, нақты уақыт режимінде деректерді бақылау генератор жұмысының сенімділігі мен энергетикалық тиімділігін арттыруда шешуші рөл атқарады [9;10].

Қаржыландыру туралы ақпарат: Бұл зерттеуді Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитеті қаржыландырды. Грант 2023 жылғы 15 қарашадағы № 394 нысаналы қаржыландыру бағдарламасы (ПЦФ)-23–25 2023 жылға арналған келісім бойынша. ИРН № BR21882294 «Жаңартылатын энергия көздеріне негізделген Қазақстанның шалғай аймақтарын автономды энергиямен жабдықтау жүйесі» мақсатты қаржыландыру бағдарламасы аясында алынып жазылды.

Қорытынды

Зерттеу нәтижелері цифрлы диагностика технологияларын микрогидро электр станцияларындағы синхронды генераторлардың жұмысын оңтайландыру процесіне енгізудің жоғары тиімділігін дәлелдеді. Ұсынылған әдістеме генератордың негізгі параметрлерін нақты уақыт режимінде үздіксіз бақылауға, алынған мәліметтерді жедел талдауға және ықтимал ақауларды ерте кезеңде анықтауға мүмкіндік береді. Бұл өз кезегінде жабдықтың сенімділігін арттырып қана қоймай, оның жұмыс ресурсын ұлғайтуға, күрделі жөнделу қажеттілігін азайтуға және жоспардан тыс тоқтауларды төмендетуге ықпал етеді.

Цифрлы датчиктерден алынған ақпаратты спектралдық талдау, машиналық оқыту және трендік болжау әдістерімен біріктіре өңдеу синхронды генератордың нақты техникалық жай-күйін жан-жақты сипаттауға мүмкіндік берді. Осындай диагностикалық деректер негізінде генератордың жүктемесін оңтайлы бөлу, магниттеу жүйесін дәл реттеу және су турбинасының жұмыс режимін үйлестіру бойынша тиімді басқару стратегиялары ұсынылды. Бұл стратегиялар микрогидроэнергетикалық қондырғының жалпы энергетикалық тиімділігін арттырып, өндірілетін электр энергиясының тұрақтылығы мен сапасын жақсартты.

Жүргізілген зерттеу микрогидро электр станцияларында цифрлы диагностикаға негізделген интеллектуалды басқару жүйелерін енгізу энергетикалық нысандардың эксплуатациялық көрсеткіштерін жақсартудың, шығындарды азайтудың және өндірістің экологиялық тұрақтылығын қамтамасыз етудің маңызды шарты екенін көрсетті. Алынған нәтижелер болашақта МГЭС жабдықтарын автоматтандыру деңгейін арттыруға, цифрлы егіз технологияларын енгізуге және генераторлардың ақауларын алдын ала болжау жүйелерін жетілдіруге негіз бола алады.

Бұл мақалада алынған нәтижелер микрогидроэлектр станцияларының жұмысын жаңа деңгейге көтеруге бағытталған нақты техникалық шешімдерге негіз болды. Цифрлы диагностика технологиялары генератор сенімділігі мен жалпы станция тиімділігін арттыратын заманауи құрал ретінде болашақта кеңінен қолданыс табуы тиіс.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

1 **Gallefoss, M.**, Synthetic inertia from a converter-fed synchronous machine in a hydro-electric power plant-modeling, control and analysis, M. S. thesis, NTNU. – Trondheim, Norway. – 2018. [Electronic resource]. – Available: – <http://hdl.handle.net/11250/2561565>

2 **Dreidy, M., Mokhlis, H., Mekhilef, S.**, Inertia response and frequency control techniques for renewable energy sources: A review, *Renew. Sustain. // Energy Rev.* – Mar. – 2017. – Vol. 69. – P. 144–155.

3 **Карелин Б. Я., Волшаник В. В.** Сооружение и оборудование малых гидроэлектростанций. – М.: Энергоатомиздат, – 2016. – с. 200.

4 **Михайлов Л. П., Резниковский А. Ш., Фельдман Б. Н.** Малая гидроэнергетика и перспективы ее развития. // *Гидротехническое строительство.* – 2015. – № 8. – С. 5–11.

5 **Bevrani, H., Hiyama, T.**, Intelligent Automatic Generation Control. – Boca Raton, FL, USA: CRC Press, – 2017.

6 Курилин, С.П., Денисов, В.Н. Особенности конструктивного исполнения и проектирования синхронных генераторов для микро-ГЭС // Вестник Московского энергетического института. Вестник МЭИ. – 2019. – № 4. – С. 78–84.

7 Ачитаев, А. А., Жидков, А. А., Наумкин, Н. С. Исследование влияния замещения возобновляемых источников энергии в составе схемы питания собственных нужд малых и микро-ГЭС // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии. – 2021. – Т. 14 (6). – С. 656–666. – <https://doi.org/10.17516/1999-494X-034>.

8 Лукутин, Б. В., Обухов, С. Г. Регулятор балластной нагрузки автономной микроГЭС // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 307. – № 3. – С. 121–126.

9 Tripathy, S., Kumar, M. D., Kumar, K. S. Optimal design of PI/PD dual mode controller based on quasi opposition based learning for power system frequency control // ePrime – Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy. – 2023. – № 4. – P. 100–135.

10 Лукутин, Б. В., Обухов, С. Г., Шандарова, Е. Б. Автономное электроснабжение от Микрогидроэлектростанций. – Томск : СТТ. – 2021. – С. 120.

REFERENCES

1 Gallefoss, M., Synthetic inertia from a converter-fed synchronous machine in a hydro-electric power plant-modeling, control and analysis, M. S. thesis, NTNU, Trondheim, Norway. – 2018. [Electronic resource]. – Available: – <http://hdl.handle.net/11250/2561565>

2 Dreidy, M., Mokhlis, H., Mekhilef, S., Inertia response and frequency control techniques for renewable energy sources: A review, Renew. Sustain. Energy Rev. – Mar, – 2017.–Vol. 69. – P. 144–155.

3 Karelina B. Ia., Volshanik V. V. Soorujenie i oborudovanie malyh gidroelektrostansi. [Construction and equipment of small hydroelectric power plants] [Text]. – M. : Energoatomizdat, – 2016. – P. 200.

4 Mihailov L. P. Reznikovskii A.Sh. Feldman B. N. Malaya gidroenergetika i perspektivi ee razvitiya. [Small hydropower and its development prospects]. [Text]. // Gidrotehnicheskoe stroitelstvo, – 2015. – № 8. – P. 5–11.

5 Bevrani, H., Hiyama, T. Intelligent Automatic Generation Control. Boca Raton. – FL, USA: CRC – P. – 2017.

6 Kurilin, S. P., Denisov, V. N. Osobennosti konstruktivnogo ispolneniya i proektirovaniya sinhronnih generatorov dlya mikro_GES // [Features of the design and implementation of synchronous generators for micro-hydroelectric power

plants]. [Text]. // Vestnik Moskovskogo energeticheskogo instituta. Vestnik MEI. – 2019. – № 4. – P. 78–84.

7 **Achitaev, A. A., Jidkov, A. A. Naumkin N. S.** Issledovanie vliyaniya zamescheniya vozobnovlyaemih istochnikov energii v sostave shemi pitaniya sobstvennih nujd malih i mikro_GES [A study of the impact of substitution of renewable energy sources in the power supply scheme of small and micro hydroelectric power plants]. [Text]. // Journ. Sib. feder. un_ta. Tehnika i tehnologii. – 2021. – Vol. 14 (6). – P. 656–666. – <https://doi.org/10.17516/1999-494X-034>.

8 **Lukutin, B. V., Obuhov S. G.** Regulyator ballastnoi nagruzki avtonomnoi mikroGES. [Ballast load regulator for an autonomous microhydroelectric power station]. [Text]. // Izvestiya Tomskogo politehnicheskogo universiteta. – 2014. – Vol. 307. – № 3. – P. 121–126.

9 **Tripathy, S., Kumar, M. D., Kumar, K. S.** Optimal design of PI/PD dual mode controller based on quasi opposition based learning for power system frequency control // ePrime – Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy. – 2023. – № 4. – P. 100–135.

10 **Lukutin, B. V., Obuhov, S. G., Shandarova, E. B.** Avtonomnoe elektrosnabjenie ot Mikrogidroelektrostancii. [Autonomous power supply from microhydroelectric power plants]. [Text]. – Tomsk : STT, – 2021. – P. 120.

Поступило в редакцию 14.09.25.

Поступило с исправлениями 06.11.25.

Принято в печать 05.12.25.

*А. О. Бердібеков¹, А. Б. Бекбаев², *К. К. Смагулова³,*

А. А. Жұматова⁴, Ж. К. Бекболатова⁵.

^{1,2,4,5}Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева, Республика Казахстан, г. Алматы;

³Карагандинский государственный технический университет имени А.Сагинова, Республика Казахстан, г. Алматы.

Поступило в редакцию 14.09.25.

Поступило с исправлениями 06.11.25.

Принято в печать 05.12.25.

ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОТЫ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА НА МИКРОГИДРО ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ НА ОСНОВЕ ЦИФРОВОЙ ДИАГНОСТИКИ

*В данной статье рассматриваются вопросы оптимизации
работы синхронного генератора на микрогидро электростанции*

(МГЭС) на основе применения методов цифровой диагностики. В исследовании анализируются сенсорные системы, алгоритмы обработки цифровых сигналов и подходы к раннему обнаружению неисправностей, позволяющие отслеживать техническое состояние генератора в режиме реального времени. Кроме того, на основе полученной диагностической информации предлагаются стратегии управления с целью эффективного распределения нагрузки генератора, повышения показателей выработки энергии и продления срока службы оборудования. Предложенная методика позволит повысить надежность объектов микрогидроэнергетики и снизить эксплуатационные расходы.

В статье рассмотрены возможности современных цифровых технологий, таких как вибродиагностика, термография, анализ тока и нагрузки, звуковой и температурный контроль, определена их роль в контроле технического состояния генератора. Отдельно остановился на эффективности автоматизированных систем контроля и сбора данных, таких как SCADA, которые обеспечивают возможность мониторинга и раннего выявления неисправностей в режиме реального времени. Кроме того, предлагаются способы автоматической оптимизации режима работы генератора с внедрением цифровых сенсорных систем и элементов искусственного интеллекта.

В ходе исследования были измерены параметры генератора в условиях конкретной микрогидростанции и на основании полученных данных выявлены факторы, влияющие на эффективность работы. Автор показывает способы повышения устойчивости производства энергии и снижения затрат на техническое обслуживание путем моделирования рабочего процесса генераторов. Кроме того, доказана важность интеграции цифровых платформ и программных инструментов для прогнозирования профиля нагрузки генератора и анализа результатов диагностики.

В целом в статье обосновывается эффективность применения оцифровки и интеллектуальных систем мониторинга в области микрогидроэнергетики. Предлагаемые подходы позволят снизить износ оборудования, продлить срок службы генератора, снизить внеплановые остановки и повысить общую энергетическую эффективность МГЭС.

Результаты исследования показывают, что внедрение интеллектуальной системы управления, основанной на цифровой диагностике, значительно повышает надежность и производительность объектов микрогидроэнергетики.

Ключевые слова: микрогидроэлектростанция, синхронный генератор, цифровая диагностика, оптимизация, обнаружение неисправностей, надежность, SCADA.

A. O. Berdibekov¹, A. B. Bekbaev², K. K. Smagulova³,

**A. A. Zhumatova⁴, Zh. K. Bekbolatova⁵.*

^{1,2,4,5}Kazakh National Research Technical University named after K. I. Satbaeva, Republic of Kazakhstan, Almaty;

³Karaganda State Technical University named after A. Saginov, Republic of Kazakhstan, Almaty.

Received 14.09.25.

Received in revised form 06.11.25.

Accepted for publication 05.12.25.

OPTIMIZATION OF SYNCHRONOUS GENERATOR OPERATION AT MICROHYDRO POWER STATION BASED ON DIGITAL DIAGNOSTICS

This article discusses the issues of optimizing the operation of a synchronous generator at a microhydroelectric power plant (MHEP) based on the use of digital diagnostic methods. The study analyzes sensor systems, digital signal processing algorithms, and approaches to early fault detection, allowing real-time monitoring of the generator's technical condition. In addition, based on the diagnostic information received, management strategies are proposed to effectively distribute the load of the generator; increase energy production and extend the service life of the equipment. The proposed methodology will improve the reliability of microhydroelectric power facilities and reduce operating costs.

The article discusses the possibilities of modern digital technologies such as vibration diagnostics, thermography, current and load analysis, sound and temperature control, and defines their role in monitoring the technical condition of the generator. He also highlighted the effectiveness of automated monitoring and data collection systems such as SCADA, which enable real-time monitoring and early detection of malfunctions. In addition, the methods of automatic optimization of the generator operation mode with the introduction of digital sensor systems and artificial intelligence elements are proposed.

During the study, the parameters of the generator were measured in the conditions of a specific microhydroelectric power plant and, based on the data obtained, factors affecting the efficiency of operation were identified.

The author shows ways to increase the sustainability of energy production and reduce maintenance costs by modeling the workflow of generators. In addition, the importance of integrating digital platforms and software tools for predicting the load profile of the generator and analyzing diagnostic results has been proven.

In general, the article substantiates the effectiveness of digitization and intelligent monitoring systems in the field of microhydroenergy. The proposed approaches will reduce equipment wear; extend the life of the generator; reduce unplanned shutdowns and increase the overall energy efficiency of the MSPP.

The results of the study show that the introduction of an intelligent control system based on digital diagnostics significantly increases the reliability and productivity of microhydroelectric power facilities.

Keywords micro hydroelectric power plant, synchronous generator; digital diagnostics, optimization, fault detection, reliability, SCADA.

Теруге 17.12.2025 ж. жіберілді. Басуға 30.12.2025 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 № 4494

Сдано в набор 17.12.2025 г. Подписано в печать 30.12.2025 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 № 4494

«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