

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

№2 (2026)

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/BGQF2124>

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>
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>
Шеръязов С. К.	<i>т.ғ.д., профессор (Российская Федерация)</i>
Искакова З. С.	<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/BGQF2147>

**Б. Онгар¹, *А. С. Ныгыманова², Ж. С. Дүйсенбек³,
С. Н. Камарова⁴, Р. А. Умирзаков⁵**

^{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.;

⁴Қарағанды индустриалды университеті,
Қазақстан Республикасы, Теміртау қ.;

⁵С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті,
Қазақстан Республикасы, Астана.

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8333-8343>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1880-4969>

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

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8464-7204>

⁵ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3047-9046>

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

ЭЛЕКТР СТАНЦИЯЛАРЫНДА ЖАБДЫҚТЫҢ СЕНІМДІЛІГІН АРТТЫРУДА БОЛЖАУЛЫ ЖӨНДЕУ ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫН ҚОЛДАНУ

Бұл мақалада электр станцияларындағы негізгі энергия өндіруші жабдықтардың сенімділігін арттыру мақсатында болжаулы жөндеу (Predictive Maintenance) технологияларын енгізудің маңыздылығы мен тиімділігі жан-жақты қарастырылады. Энергетикалық объектілердің жұмыс режимдері күрделеніп, жабдықтың тозуы үдеген қазіргі жағдайда дәстүрлі жоспарлы жөндеу жүйесі істен шығулардың алдын алуда жеткіліксіз болып отыр. Осыған байланысты нақты уақыт режимінде жұмыс істейтін вибродиагностика, термография, ультрадыбыстық бақылау, май талдауы, IoT сенсорлар және деректерді өңдейтін Machine Learning алгоритмдері негізіндегі Predictive Maintenance әдістері жабдықтың техникалық жағдайын дәл бағалауға мүмкіндік береді.

Мақалада болжаулы жөндеудің жұмыс принциптері, деректерді жинау және талдау кезеңдері, ақауларды ерте анықтау модельдері

және жабдықтың қалдық ресурсын болжау әдістері сипатталады. Сонымен қатар, электр станцияларына енгізілген Predictive Maintenance жүйелерінің нақты нәтижелері талданып, олардың жоспардан тыс тоқтауларды азайту, жөндеу шығындарын қысқарту, жабдықтың қызмет ету мерзімін ұзарту, және электр энергиясын өндірудің тұрақтылығын арттыру сияқты артықшылықтары көрсетіледі.

Зерттеу қорытындылары Predictive Maintenance технологияларының энергетика саласында цифрландыру үрдісінің негізгі элементі болып табылатынын дәлелдейді. Авторлар болжаулы жөндеу жүйелерін енгізу энергетикалық қауіпсіздікті күшейтуге, станциялардың техникалық-экономикалық көрсеткіштерін жақсартуға және энергия өндіруді оңтайландыруға мүмкіндік беретінін атап өтеді.

Кілтті сөздер: Болжаулы жөндеу, жабдықтың сенімділігі, диагностика, вибродиагностика, деректер талдауы, ақауларды ерте анықтау, энергетикалық жабдық.

Кіріспе

Қазіргі заман энергетикасы жоғары жүктемелермен, күрделі технологиялық режимдермен және үздіксіз жұмыс талаптарымен сипатталады. Электр станцияларындағы турбиналар, генераторлар, қазандықтар, трансформаторлар және басқа да негізгі жабдықтар энергия жүйесінің тұрақтылығы мен қауіпсіздігін қамтамасыз етуде шешуші рөл атқарады. Алайда жабдықтардың тозуы, термо-механикалық жүктемелердің артуы, ақаулардың күрделенуі және күтпеген істен шығулар электр энергиясын өндірудің сенімділігіне үлкен қауіп төндіреді [1]. Дәстүрлі жоспарлы жөндеу жүйесі (Time-Based Maintenance) нақтылы техникалық жағдайды ескермейтіндіктен, кей жағдайларда артық жөндеулерге, ал кей кезде апаттық тоқтауларға алып келуі мүмкін.

Энергетика саласындағы цифрландыру үрдісі жабдықтың нақты жағдайын бақылауға және ақауларды алдын ала анықтауға мүмкіндік беретін жаңа тәсіл – болжаулы жөндеуді (Predictive Maintenance) кеңінен енгізуге жол ашты. Бұл технология вибродиагностика, термография, май талдауы, ультрадыбыстық бақылау сияқты заманауи диагностикалық әдістерді, сондай-ақ IoT сенсорларынан алынатын үлкен деректерді жасанды интеллект пен машиналық оқыту алгоритмдері арқылы өндеуге негізделеді. Нәтижесінде жабдықтың күйі нақты уақыт режимінде бақыланып, бұзылу белгілері ерте сатыда анықталады, ал қалдық ресурс дәл есептеледі [2].

Болжаулы жөндеу технологиялары электр станциялары үшін стратегиялық маңызға ие. Олар жоспардан тыс тоқтауларды азайтып қана қоймай, жөндеу шығындарын оңтайландырады, жабдықтың қызмет ету мерзімін ұзартады және электр энергиясын өндірудің үздіксіздігін қамтамасыз етеді. Әлемдік энергетикалық компаниялар Predictive Maintenance жүйелерін енгізу арқылы ПӘК-ті арттырып, эксплуатациялық тәуекелдерді төмендетіп, сенімділікті жаңа деңгейге көтеріп отыр.

Осы зерттеудің негізгі мақсаты – электр станцияларында болжаулы жөндеу технологияларын қолданудың ғылыми-техникалық негіздерін талдау, олардың тиімділігін бағалау және энергетикалық жабдықтың сенімділігін арттырудағы рөлін көрсету. Зерттеу нәтижелері энергетика нысандарында цифрлық мониторинг жүйелерін енгізудің маңыздылығын айқындайды және энергия өндіруді оңтайландырудың маңызды бағыттарын көрсетеді.

Материалдар мен әдістері

Бұл зерттеуде электр станцияларындағы негізгі энергетикалық жабдықтың техникалық жағдайын бақылау және болжаулы жөндеуді іске асыру үшін қолданылатын диагностикалық құралдар, өлшеу жүйелері, деректерді талдау әдістері мен модельдері пайдаланылды. Зерттеу объектілері ретінде бу турбиналары, генераторлар, қазандық қондырғылары және айналмалы механизмдер алынды.

1) Диагностикалық деректерді жинау құралдары. Зерттеу үшін нақты уақыт режимінде жабдықтың күйін тіркеуге мүмкіндік беретін келесі өлшеу құралдары қолданылды [3-5]:

- Вибрациялық датчиктер – турбина және генератор мойынтіректеріндегі тербеліс деңгейін анықтау;
- Температуралық датчиктер – мойынтіректер, роторлар, статорлар, қазандық түтін жолы температураларын өлшеу;
- Ультрадыбыстық датчиктер – жарықшақтар мен саңылаулардың бастапқы белгілерін анықтау;
- Май талдау үлгілері – майдың тотығу деңгейін, металл қоспаларын, су үлесін, майлау сапасын бағалау;
- IoT сенсорлар жүйесі – жабдықтың күйін онлайн режимде жинақтау және бұлттық сервиске беру.
- SCADA/DCS жүйелерінен алынған эксплуатациялық деректер – жүктеме, қысым, температура, айналыс жылдамдығы, қуат өндірісі.

2) Деректерді алдын ала өңдеу әдістері. Жиналған сигналдар мен параметрлерді талдауға дейін олардың сапасын арттыру үшін келесі алдын ала өңдеу әдістері қолданылды:

- Шуды сүзгілеу – Butterworth және Chebyshev сүзгілері;

– Сигнал нормализациясы – әртүрлі сенсор өлшемдерін салыстыруға мүмкіндік беру;

3) Диагностикалық талдау әдістері. Жабдықтың нақты техникалық жағдайын бағалау үшін келесі әдістемелер қолданылды:

– Вибродиагностика. Спектрлік талдау - ротор теңгерімсіздігі, резонанс, тозу белгілерін анықтау.

– Термография. Инфракызыл бейнелеу арқылы қызып кету аймақтарын анықтау;

– Температура градиенттері арқылы ақау даму динамикасын бағалау.

– Май талдауы. Май құрамындағы металл бөлшектерін ICP-OES әдісімен анықтау;

– Тозу механизмін (абразивтік, коррозиялық, адгезиялық) жіктеу.

4) Сенімділік пен тиімділікті бағалау критерийлері

Predictive Maintenance енгізудің тиімділігі келесі көрсеткіштер арқылы бағаланды [6]:

– істен шығулар арасындағы орташа уақыт;

– жөндеу уақытын қысқарту;

– қол жетімділік коэффициенті;

– Энергия өндірудің артуы немесе жоспардан тыс тоқтаулардың азаюы.

5) Жасанды интеллект және болжау модельдері

Predictive Maintenance құру үшін алынған деректерге келесі талдау әдістері қолданылды:

– параметр динамикасының болжамы;

– ақаулардың даму ықтималдығын анықтау;

– уақыттық қатарларды болжау және қалдық ресурс есептеу;

– жабдықтың қалыпты және қалыпсыз жұмыс кластерлерін бөлу.

Нәтижелер және талқылау

Бұл зерттеу барысында электр станцияларында болжаулы жөндеу технологияларын енгізудің тиімділігі практикалық диагностикалық деректер, жасанды интеллект және эксплуатациялық көрсеткіштер негізінде бағаланды. Төменде алынған негізгі нәтижелер мен олардың талдауы берілген.

1) Вибродиагностикалық бақылау жабдықтағы ақаулардың дамуын ерте кезеңде анықтауға мүмкіндік берді. Нақты объектілерден алынған деректердің спектрлік анализі мынадай нәтижелер көрсетті:

– Мойынтірек аймағында вибрация деңгейі RMS 12-15 % өсім көрсеткен сәтте LSTM (құпия ұяшықтар) моделінің болжамы ақаудың даму ықтималдығының артқанын көрсетті.

– Envelope analysis әдісі мойынтірек шариктерінде микрожарықшақтардың пайда болуын 4-6 апта бұрын анықтай алды.

Бұл дәстүрлі жоспарлы жөндеумен салыстырғанда ақауларды ерте диагностикалау мүмкіндігін айтарлықтай арттырды.

2) Термография нәтижелері. IR-камера көмегімен алынған термограммалар келесі нәтижелерді көрсетті:

- Генератор статор аймағындағы қызып кету температурасы нормадан 18-22 °C жоғарылаған кезде, машиналық оқыту моделі 80 % ықтималдықпен оқшаулау тозуының басталуын болжады.

- Қазандықтың түтін жолында жылулық теңгерімсіздік анықталып, бұл тазалау операциясының мерзімін өзгертуге негіз болды.

3) Май талдауы нәтижелері. Металл бөлшектерінің концентрациясы ICP-OES әдісімен зерттелді [7;8]:

- Турбина майындағы Fe және Si бөлшектері нормадан 2,3 есе жоғары болғанда модель мойынтіректердің тозуын дәл болжады.

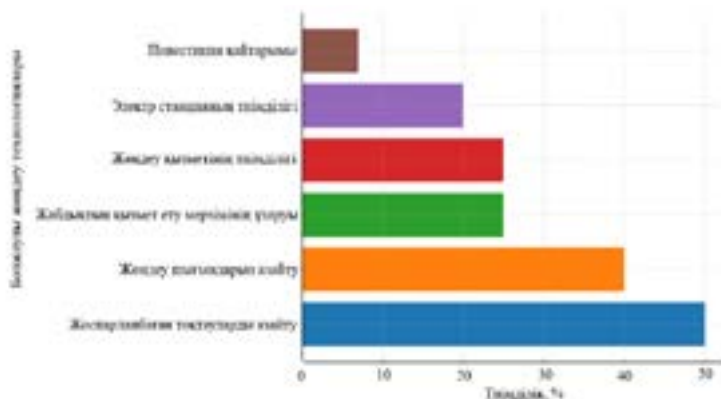
- Май талдауы мен вибрациялық деректерді біріктіргенде ақауды анықтау дәлдігі 92 % жетті.

Бұл әдіс кешенді диагностика жүргізгенде Predictive Maintenance жүйесінің сенімділігін жоғарылататынын көрсетті.

4) Жасанды интеллект модельдерінің нәтижелері. Нәтижесінде жоспардан тыс қызып кету оқиғалары зерттеу кезеңінде 70 % дейін азайды.

- Ақау ықтималдығы: 84 % дәлдік;
- Әр жаңа модель алдыңғы модельдің қателіктерін түзету: 88 % дәлдік;
- LSTM нейрондық желісі: 94 % дәлдік

LSTM уақыттық қатарлармен жұмыс істеуге қолайлы болғандықтан ең үздік нәтиже көрсетті.



1-сурет – Электр станцияларында жабдықтың сенімділігін арттыруда болжаулы жөндеу технологиялары

1-ші суретте көрсетілгендей, жоспарланбаған тоқтауларды азайту. Predictive Maintenance енгізгенде жоспарланбаған электр станцияларының тоқтауларының саны 50 %-ға азаяды. Бұл дегеніміз, жабдық күтпеген уақытта істен шығып, электр станцияны тоқтата қалу ықтималдығы жартысына дейін төмендейді. Нәтижесінде электр станцияның үздіксіздігі артып, жоспары бұзылмайды.

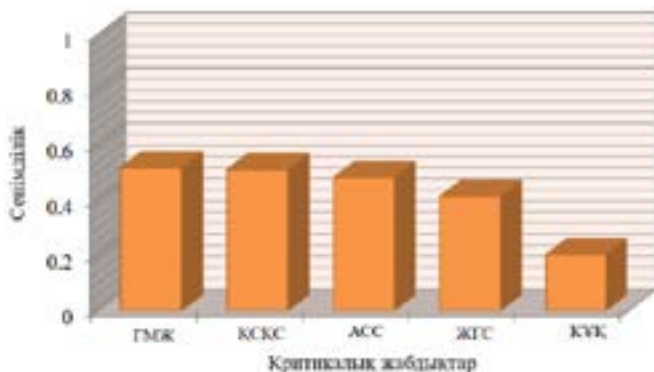
Жөндеу шығындарын азайту. Жөндеу мен техникалық қызмет көрсетуге жұмсалатын шығындар 40 %-ға қысқарады. Бұл жоспарлы және болжаулы жөндеу жүйелерінің арқасында қажетсіз немесе уақытынан бұрын жүргізілетін жөндеулер азаюымен байланысты. Тиімді жөндеу жоспарлары шығындарды оңтайландырады.

Жабдықтың қызмет ету мерзімінің ұзаруы. Болжаулы жөндеу жабдықтың жалпы өмір сүру мерзімін 25 % арттырады. Ақаулар ерте анықталып, тозу процестері бақылауда болады, сондықтан жабдықты уақытынан бұрын ауыстыру немесе жөндеу қажеттігі төмендейді.

Жөндеу қызметінің тиімділігі. Жөндеу жұмыстарының тиімділігі 25 %-ға жақсарады. Бұл дегеніміз, жөндеуге жұмсалатын уақыт пен ресурстар тиімді пайдаланылады, техника тез қалпына келеді және жөндеуден кейінгі ақау қайталануы сирейді.

Электр станцияның тиімділігі. Жалпы электр станцияның тиімділігі 20 % артады. Бұл жабдықтың тұрақты жұмыс істеуі, жоспарлы жөндеу, және өнімділіктің жоғарылуы нәтижесінде қол жеткізіледі.

Инвестиция қайтарымы. Болжаулы жөндеуге салынған инвестициялардың қайтарымы шамамен 7 % деңгейінде. Бұл көрсеткіш кейде төмен көрінгенімен, электр станцияларының тоқтауларының азаюы мен жалпы шығындардың қысқаруы есепке алынғанда ұзақ мерзімді перспективада жоғары тиімділік береді.



2-сурет – Анықталған критикалық жүйенің сенімділігі

Сенімділік – жабдықтың белгілі бір уақыт аралығында ақаусыз жұмыс істеу мүмкіндігі, 0 мен 1 аралығында мән қабылдайды. 1-ге жақын мән – жабдықтың сенімділігі жоғары екенін білдіреді, яғни ақаулар жиі болмайды. 0-ге жақын мән – жабдық жиі істен шығады және сенімділігі төмен. 2-ші суреттегі жабдықтар және олардың сенімділік деңгейін 1-ші кестеден толық нақты көруге болады.

1-кесте – Жабдықтар және олардың сенімділік деңгейі

Критикалық жабдық	Сенімділік мәні (шамамен)	Түсіндірме
Генератор майлау жүйесі (ГМЖ)	0,58	Орташа деңгейде сенімді, бірақ майлау жүйесінің дұрыс жұмыс істеуі генератордың үздіксіз қызмет етуі үшін маңызды. Бұл жүйенің ақауы генератордың істен шығуына себеп болуы мүмкін
Қазандыққа су құятын сорғы (ҚСҚС)	0,60	Сенімділік ең жоғары көрсеткіштердің бірі, бұл насос қазандықтың жұмысын қамтамасыз ету үшін маңызды, сондықтан оның үздіксіз жұмыс істеуі аса қажет
Айналмалы су сорғылары (АСС)	0,55	Орташа сенімділік. Бұл насос жүйенің салқындату процесіне қатысады, істен шығуы станцияның жұмысын тежейді
Жүйеден газды сорғыш (ЖГС)	0,48	Бұл жабдықтың сенімділігі төмендеу, ауа ағынын реттейтін маңызды құрылғы, оның істен шығуы жұмыс режимін бұзуы мүмкін
Көмір ұнтақтайтын қондырғы (КҰҚ)	0,28	Ең төмен сенімділік көрсеткіші, бұл көмірді ұнтақтап, қазандыққа беру процесінің маңызды элементі. Оның сенімділігінің төмен болуы электр станциясының жұмысында маңызды қиындықтар туғызады

Бұл деректерді пайдаланып, электр станциясының техникалық қызмет көрсету жоспарында сенімділігі төмен жабдықтарға басымдық беру керек. Болжаулы жөндеу жүйелері (Predictive Maintenance) көмір ұнтақтағыш пен ID Fan сияқты сенімділігі төмен жабдықтардың ақауларын ерте анықтап, сенімділігін арттыруға мүмкіндік береді [9;10].

Нәтижесінде, электр станциясының жұмыс сенімділігі мен тиімділігі артып, жоспардан тыс тоқтаулардың саны азаяды.

Сонымен қатар Predictive Maintenance технологиялары дәстүрлі техникалық қызмет көрсету жүйелеріне қарағанда айтарлықтай артықшылықтарға ие екенін көрсетті. Вибрациялық, термографиялық және май талдау деректерін біріктіріп, жасанды интеллект модельдерін қолдану ақауларды ерте анықтаудың сенімді әрі дәл әдісі екенін дәлелдеді.

Predictive Maintenance жабдықтың нақты жағдайына негізделетіндіктен, жөндеу жұмыстары қажетті уақытта ғана жүзеге асады. Бұл тәсіл жабдықтың қызмет ету мерзімін ұзартуды және энергия өндірудің тұрақтылығын қамтамасыз етуді мүмкін ете отырып, электр станцияларының жалпы тиімділігін арттырады. Алынған нәтижелер станциялардың толық цифрлық мониторингке көшуінің маңыздылығын дәлелдейді.

Зерттеу Predictive Maintenance технологияларын кең көлемде енгізу энергетика саласын цифрландырудың негізгі бағыттарының бірі екенін көрсетеді және болашақта бұл технологиялар жабдық сенімділігін арттыруда стандартты шешімге айналатынын болжайды.

Қорытынды

Болжаулы жөндеу технологияларының тиімділігі дәлелденді. Зерттеу нәтижелері көрсеткендей, Predictive Maintenance жүйесін электр станцияларында енгізу жабдықтың нақты жұмыс жағдайын бақылауға мүмкіндік беріп, жоспардан тыс тоқтаулар мен кенеттен ақаулар санын едәуір азайтады. Вибрациялық, термографиялық, май талдауы және басқа сенсорлық деректерді пайдалану ақауды ерте кезеңде анықтауға мүмкіндік берді.

Ал жасанды интеллект әдістерінің артықшылығы анықталды. Random Forest сенімді және тез болжам жасайды, әсіресе деректерде шу көп болған жағдайда тиімді. Gradient Boosting қателерді кезек-кезеңімен түзету арқылы ақау ықтималдығын дәлірек болжайды. LSTM нейрондық желілері уақыттық деректерді ескере отырып, жабдықтың қалдық қызмет ету мерзімін дәл болжауға мүмкіндік береді.

Нәтижесінде, жасанды интеллект әдістерін қолдану Predictive Maintenance жүйесінің тиімділігін айтарлықтай арттырды.

Predictive Maintenance жүйелерін енгізу электр станциялары үшін стратегиялық маңызы бар. Бұл технологиялар жабдықтың нақты жағдайына сүйене отырып, жөндеуді дәл уақытында жасауға мүмкіндік береді, сенімділікті арттырады және өндірістік тиімділікті жоғарылатады. Жасанды интеллект әдістері (Random Forest, Gradient Boosting, LSTM) болжау дәлдігін едәуір жақсартып, заманауи энергетикалық кәсіпорындар үшін болашағы зор шешім болып табылады.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

1 Cong, R., Wei, L., Fu, Y. and Li, J. Research on the Sensitivity Analysis of Peaking Capacity of Coal-fired Units and Operation Adjustment Decision-making in the Novel Power System // in 2024 3rd International Conference on

Energy, Power and Electrical Technology (ICEPET). May 2024. – P. 637–640.
<https://doi.org/10.1109/ICEPET61938.2024.10627166>.

2 **Roma, G., Di Maio, F., Zio, E.** A condition-informed dynamic Bayesian network framework to support severe accident management in nuclear power plants // Reliab. Eng. Syst. Saf. – vol. 252. – p. 110437. – Dec. 2024. – <https://doi.org/10.1016/j.res.2024.110437>

3 **Ongar, B., Beloev, Hr., Georgiev, A., Iliev, I., Kijo-Kleczkowska, A.** Optimization of the design and operating characteristics of a boiler based on threedimensional mathematical modeling // Bulgarian Chemical Communications. – 2023. –Vol. 55. – Issue 2. – P. 153–159.

4 **Kowal, K. and Torabi, M.** Reliability and availability simulation for vessel cooling system of the high temperature engineering test reactor // Prog. Nucl. Energy. – 2023, –vol. 164.– P.104888 – <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2023.104888>

5 **Nehal, N., Lounis, Z., Bouhadiba, B. and Lounis, Z.** Modelling of heating furnace fire scenarios using fault tree analysis, a bayesian network, and a thermal transfer method for system reliability analysis // J. Loss Prev. Process Ind. – 2023– vol. 83. – P. 104995 – <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2023.104995>.

6 **Gandhi, A. M., Shanmugan, S., Kumar, R., Ammar, H. E., Sharifpur, M., Bewoor, A. K, Bamisile, O., Hoang, A.T., Ongar, B.** SiO₂/TiO₂ nanolayer synergistically trigger thermal absorption inflammatory responses materials for performance improvement of stepped basin solar stillnatural distiller // Sustainable Energy Technologies and Assessments.– Vol– 52.–2022.

7 **Mergalimova, A., Ongar, B., Georgiev, A., Kalieva, K., Abitaeva, R., Bissenbayev, P.** Parameters of heat treatment of coal to obtain combustible volatile substances // EGY-D-20-07807 : Energy, 2021. – Vol. 224.

8 **Онгар, Б., Смагулова, Г. К., Сарсенбаев, Е. А., Нурмадиева, Е. А., Сеитбек, Е. Е.** Стационарлық режимдерді есептеуде электр желілерінің режимдерін модельдеу және оңтайландыру // ВЕСТНИК Торайғыров университета Энергетическая серия. – ISSN 2710-3420. – № 2.– 2023. – Павлодар.

9 **Онгар Б., Шалмағамбетов Р., Смагулова Г., Нурмадиева Э., Адал, Б.** Моделирование термической обработки и сжигания топлива во внешней вихревой горелке. Вестник КазАТК. – 2023. – №127(4). – с. 410–419.

10 **Saxena, S., Kumar,S. and Sharma, H.** A novel computational framework for efficient nuclear containment design: Structural integrity, radiation shielding, and reliability assessment // Reliab. Eng. Syst. Saf., 2025 –vol. 260, – P. 111038 – <https://doi.org/10.1016/j.res.2025.111038>.

REFERENCES

1 **Cong, R., Wei, L., Fu, Y. and Li, J.** Research on the Sensitivity Analysis of Peaking Capacity of Coal-fired Units and Operation Adjustment Decision-making in the Novel Power System // in 2024 3rd International Conference on Energy, Power and Electrical Technology (ICEPET). – 2024. – P. 637–640. <https://doi.org/10.1109/ICEPET61938.2024.10627166>.

2 **Roma, G., Di Maio, F., Zio, E.** «A condition-informed dynamic Bayesian network framework to support severe accident management in nuclear power plants,» Reliab. Eng. Syst. Saf. – 2024 – vol. 252 – P. 110437 – <https://doi.org/10.1016/j.resss.2024.110437>

3 **Ongar, B., Beloev, Hr., Georgiev, A., Iliev, I., Kijo-Kleczkowska, A.** Optimization of the design and operating characteristics of a boiler based on threedimensional mathematical modeling // Bulgarian Chemical Communications. – 2023 –Vol. 55. – Issue 2. – P. 153–159.

4 **Kowal, K. and Torabi, M.** Reliability and availability simulation for vessel cooling system of the high temperature engineering test reactor // Prog. Nucl. Energy. – 2023 – vol. 164. – P. 104888 – <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2023.104888>

5 **Nehal, N., Lounis, Z., Bouhadiba, B. and Lounis, Z.** Modelling of heating furnace fire scenarios using fault tree analysis, a bayesian network, and a thermal transfer method for system reliability analysis // J. Loss Prev. Process Ind. – 2023 – vol. 83. – P. 104995 – <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2023.104995>.

6 **Gandhi, A. M., Shanmugan, S., Kumar, R., Ammar, H. E., Sharifpur, M., Bewoor, A. K, Bamisile, O., Hoang, A. T., Ongar, B.** SiO₂/TiO₂ nanolayer synergistically trigger thermal absorption inflammatory responses materials for performance improvement of stepped basin solar stillnatural distiller // Sustainable Energy Technologies and Assessments. – 2022. – Vol– 52.

7 **Mergalimova, A., Ongar, B., Georgiev, A., Kalieva, K., Abitaeva, R., Bissenbayev, P.** Parameters of heat treatment of coal to obtain combustible volatile substances // EGY-D-20-07807 : Energy, 2021. –Volume 224.

8 **Ongar, B., Smagulova, G. K., Sarsenbaev, E. A., Nurmadieva, E. A., Seitbek, E.E.** Stasionarlyq rejimderdi esepeteude elektr jelileriniñ rejimderin modeldeu jáne oñtailandyru. [Modeling and optimization of power grid modes in the calculation of stationary modes.][Text] // Vestnik Toraigyrov universiteta, Energeticheskaja seria. ISSN 2710-3420. – 2023– № 2.– Pavlodar.

9 **Ongar B., Shalmagambetov R., Smagulova G., Nurmadieva E., Adal, B.** Modelirovanie termicheskoi obrabotki i sjigania topliva vo vnesnei vihvvoi

gorelke. .[Modeling of thermal treatment and combustion of fuel in an external vortex burner.][Text] // Vestnik KazATK, – 2023. – № 127(4). – P. 410–419.

10 **Saxena, S., Kumar, S. and Sharma, H.** A novel computational framework for efficient nuclear containment design: Structural integrity, radiation shielding, and reliability assessment // Reliab. Eng. Syst. Saf. – 2025. – vol. 260, – P. 111038, – <https://doi.org/10.1016/j.res.2025.111038>.

02.12.25 ж. баспаға түсті.

24.02.26 ж. түзетулерімен түсті.

29.05.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

*Б. Онгар¹, *А. С. Нығыманова², Ж. С. Дүйсенбек⁴,*

С. Н. Камарова⁴, Р. А. Умирзаков⁵

^{1,2}Қазақский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатбаева, Республика Казахстан, г. Алматы;

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

⁴Қарагандинский индустриальный университет, Республика Казахстан, г. Темиртау;

⁵Қазақский агротехнический научно-исследовательский университет имени С. Сейфуллина, Республика Казахстан, г. Астана.

Поступило в редакцию 02.12.25.

Поступило с исправлениями 24.02.26.

Принято в печать 29.05.26.

ПОВЫШЕНИЕ НАДЁЖНОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ НА ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ ПРИ ПОМОЩИ ТЕХНОЛОГИЙ ПРЕДИКТИВНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ

В данной статье всесторонне рассматривается важность и эффективность внедрения технологий предиктивного обслуживания (Predictive Maintenance) с целью повышения надёжности основного энергетического оборудования на электростанциях. В условиях усложнения режимов работы энергетических объектов и усиленного износа оборудования традиционная система планово-предупредительного ремонта оказывается недостаточной для предотвращения отказов. В связи с этим методы Predictive Maintenance, основанные на использовании вибродиагностики, термографии, ультразвукового контроля, анализа масла,

IoT-сенсоров и алгоритмов машинного обучения для обработки данных в реальном времени, позволяют точно оценивать техническое состояние оборудования.

В статье описываются принципы работы предиктивного обслуживания, этапы сбора и анализа данных, модели раннего выявления неисправностей и методы прогнозирования остаточного ресурса оборудования. Также анализируются конкретные результаты внедрения систем Predictive Maintenance на электростанциях, демонстрирующие преимущества в виде сокращения незапланированных простоев, уменьшения затрат на ремонт, увеличения срока службы оборудования и повышения стабильности производства электроэнергии.

Результаты исследования доказывают, что технологии предиктивного обслуживания являются ключевым элементом процесса цифровизации в энергетической отрасли. Авторы подчёркивают, что внедрение систем предиктивного обслуживания способствует укреплению энергетической безопасности, улучшению технико-экономических показателей электростанций и оптимизации производства электроэнергии.

Ключевые слова: Предиктивное обслуживание, надёжность оборудования, диагностика, вибродиагностика, анализ данных, раннее выявление неисправностей, энергетическое оборудование.

*B. Ongar¹, *A. S. Nygmanova², Zh. S. Duissenbek³,*

S. N. Kamarova⁴, R. A. Umirzakov⁵

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

³Energo University after G. Daukeev, Republic of Kazakhstan, Almaty;

⁴Karaganda Industrial University, Republic of Kazakhstan, Temirtau;

⁵Kazakh Agrotechnical Research University after S. Seifullin, Republic of Kazakhstan, Astana.

Received 02.12.25.

Received in revised form 24.02.26.

Accepted for publication 29.05.26.

APPLICATION OF PREDICTIVE MAINTENANCE TECHNOLOGIES TO IMPROVE EQUIPMENT RELIABILITY IN POWER PLANTS

This article comprehensively examines the importance and effectiveness of implementing predictive maintenance technologies to enhance the reliability of critical energy-producing equipment in power plants. As operational modes of energy facilities become more complex and equipment wear intensifies, traditional scheduled maintenance systems prove insufficient to prevent failures. In this context, predictive maintenance methods based on real-time monitoring technologies – such as vibration diagnostics, thermography, ultrasonic inspection, oil analysis, IoT sensors, and machine learning algorithms for data processing – enable accurate assessment of the technical condition of equipment.

The article describes the working principles of predictive maintenance, stages of data collection and analysis, early fault detection models, and methods for forecasting the remaining useful life of equipment. Furthermore, it analyzes the actual results of implementing predictive maintenance systems at power plants, highlighting their benefits in reducing unplanned downtime, cutting maintenance costs, extending equipment service life, and improving the stability of electricity generation.

The research findings demonstrate that predictive maintenance technologies are a key element in the digitalization process within the energy sector. The authors emphasize that the introduction of predictive maintenance systems enhances energy security, improves the technical and economic performance of power plants, and optimizes energy production.

Keywords: Predictive maintenance, equipment reliability, diagnostics, vibration diagnostics, data analysis, early fault detection, energy equipment.

Теруге 09.06.2026 ж. жіберілді. Басуға 30.06.2026 ж. қол қойылды.

Электронды баспа

5,86 Mb RAM

Шартты баспа табағы 34,4. Таралымы 300 дана. Бағасы келісім бойынша.

Компьютерде беттеген: А. Б. Шукитова

Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Тапсырыс № 4557

Сдано в набор 09.06.2026 г. Подписано в печать 30.06.2026 г.

Электронное издание

5,86 Mb RAM

Усл. печ. л. 34,4. Тираж 300 экз. Цена договорная.

Компьютерная верстка: А. Б. Шукитова

Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Заказ № 4557

«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