

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

<https://doi.org/10.48081/BMFY9640>

***Г. С. Нұрмағанбетова¹, В. В. Каверин²,
Г. А. Эм³, С. С. Исенов⁴, В. М. Дружинин⁵**

^{1,4}С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті,
Қазақстан Республикасы, Астана қ.

^{2,3}Абылқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті,
Қазақстан Республикасы, Қарағанды қ.

⁵Қарағанды индустриалды университеті,
Қазақстан Республикасы, Теміртау қ.

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9529-2477>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2021-7445>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2639-0492>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4576-4621>

⁵ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7261-8780>

*e-mail: g_sahitovna@mail.ru

ЖЕЛ ТУРБИНАСЫНЫҢ ЭЛЕКТР МЕХАНИКАЛЫҚ БӨЛІГІНДЕГІ ҚЫСҚА ТҰЙЫҚТАЛУ РЕЖИМДЕРІН МАТЕМАТИКАЛЫҚ ЖӘНЕ ИМИТАЦИЯЛЫҚ МОДЕЛДЕУ

Энергиямен жабдықтау құрылымындағы жел энергетикасы үлесінің тұрақты өсуі аясында жел турбиналарының, атап айтқанда, редукторсыз конструкциялардың сенімділігін арттыруға бағытталған зерттеулер ерекше маңызға ие. Редукторсыз турбиналар жеңілдетілген механикалық схемамен және пайдалану шығындарының төмендеуімен ерекшеленеді, бірақ олар сыртқы жүктеменің ауытқуларына және динамикалық әсерлерге сезімтал. Мақалада жел турбина генераторының қуат тізбегіндегі қысқа тұйықталу режимдерін зерттеудің қажеттілігі қарастырылған. Қуаты 40 кВт-қа дейінгі жел турбинасының электромеханикалық бөлігінің математикалық моделінің теңдеулерін таңдау жүзеге асырылды және дәлелденді. Қысқа тұйықталу кезіндегі динамикалық процестерді зерттеу үшін қолданбалы бағдарламалар пакеті MATLAB/Simulink-те жел турбинасының электромеханикалық бөлігінің математикалық және имитациялық модельдері жасалды.

Имитациялық модельдеуде үш фазалы екі жартылай периодты түзеткіштің инерция моменттері, кедергілері мен коммутациялық қасиеттері ескерілді. Бос жүріс және жүктеме режимдеріндегі өтпелі процестердің теориялық және эксперименттік түрде алынған нәтижелері салыстырылды. Модельдеудің максималды қателігі үдеткіштің бастапқы кезеңдерінде 10 %-дан аспайтыны және тұрақты режимде 1,5 %-ға дейін төмендейтіні анықталды, бұл модельдің инженерлік есептеулер мен қысқа тұйықталу режимдерін талдауға сәйкестігін растайды.

Кілтті сөздер: жел турбинасы, қысқа тұйықталу, имитационды модельдеу, математикалық модель, өтпелі процестер, үш фазалы түзеткіш.

Кіріспе

Энергетиканы дамытудың қазіргі кезеңінде жел турбиналарын пайдалану арқылы өндірілетін электр энергиясы үлесінің тұрақты өсу үрдісі байқалады. Соңғы 20 жылда жаңадан енгізілетін заманауи жел турбиналары санының жыл сайынғы тұрақты өсуі байқалуда [1, 16].

Қуаты 40 кВт жоғары жел турбиналары, әдетте, жалпы электрмен жабдықтау жүйесінде жұмыс істейді, ал қуаты 40 кВт қа дейінгі қондырғылар негізінен автономды энергия жүйелерінде қолданылады.

Қуаты 40 кВт-тан төмен қазіргі заманғы жел турбиналарында редукторсыз типтегі сериялық өнімдердің санының арту үрдісі байқалады, бұл олардың сенімділігі мен техникалық-экономикалық көрсеткіштерін едәуір жақсартады. Қуаты 40 кВт-тан төмен жел турбиналарының қосымша конструктивтік ерекшелігі – жел жылдамдығына байланысты турбина қанатының айналу жазықтығына көлбеу бұрышын автоматты түрде түзету жүйесінің болмауы болып табылады. Бұл жағдайда желдің жылдамдығына байланысты генератордың шығысындағы кернеу жиілігі мен амплитудасы өзгереді. Жүктеме тізбегінде инвертордың болуы кернеудің амплитудасы мен жиілігін тұрақтандыруды қамтамасыз етеді [2; 3; 4].

Жел турбиналарын жобалау кезінде қоршаған ортаның биосферасына теріс әсерді азайту және инновациялық техникалық шешімдердің тиімділігін арттыру, сондай-ақ климаттық жағдайлардың олардың сенімділігіне әсерін азайту мәселелері шешіледі [5; 6; 7].

Жел турбиналары өндіретін электр энергиясының қымбаттығына қарамастан, көміртегі және ядролық электр станциялары өндіретін энергияның өзіндік құнымен салыстырғанда, қазіргі уақытта жаңадан енгізілетін жел турбиналары мен олардың сенімділігін арттыруға және

өндірілетін электр энергиясының өзіндік құнын төмендетуге бағытталған ғылыми-техникалық әзірлемелердің тұрақты өсуі байқалады.

Жел турбиналарын ұзақ пайдалану процесінде жел турбиналарының сенімділігі мен апатсыз ұзақ мерзімді жұмысына теріс әсер ететін факторлардың жиынтығы анықталды. Жел турбиасының максималды өндірілетін қуатын қамтамасыз ететін желдің ең қолайлы сипаттамалары жағалау теңіз аймағында байқалады. Жоғары ылғалдылықтың, қоршаған ауадағы тұздың жоғары концентрациясының болуы, сондай-ақ жағалау аймағындағы температураның айтарлықтай өзгеруі жел турбиналарының сенімділігіне айтарлықтай теріс әсер етеді [8; 9; 10].

Тұрақты магниттердегі үш фазалы айнымалы кернеу генераторы бар редукторсыз типтегі жел турбиналарында генератор қысқыштарындағы кернеу және оның жиілігі генератор білігінің бұрыштық айналу жылдамдығына пропорционалды түрде тәуелді. Жел жылдамдығының 5–20 м / с жұмыс диапазонында кернеу 10–48 В диапазонында, сондай – ақ 50–250 Вольтта өзгереді, генератор қысқыштарындағы кернеу жиілігі ГН сериялы жел турбиналары үшін 30–120 Гц диапазонында өзгереді.

Жел турбиналарында генератордан электр энергиясы желдің бағытына байланысты айналатын жел турбиасының гондоласынан қозғалмайтын мұнараға үш фазалы электр энергиясын беруді қамтамасыз ететін жылжымалы байланыс құрылғысы арқылы беріледі. Бұдан әрі электр энергиясы тарату құрылғысына дейін кабельдік өнім арқылы беріледі. Жел турбиасын ұзақ уақыт пайдалану кезінде климаттық факторлардың әсерінен жел турбиасының үш фазалы электр беру жүйесінің элементтерінде қысқа тұйықталу ықтималдығы жоғары болады.

Тұздың жоғары концентрациясы бар жоғары ылғалдылық, қоршаған орта температурасының жиі өзгеруі, жел турбиасы құрылымының дірілі, сондай-ақ найзағай разряды және жел турбиасының коммутациялық кернеуі сияқты факторлар электр қуатының сенімділігін төмендетеді. Жоғарыда аталған факторлар электр кабелінің оқшаулауының бұзылуына және нәтижесінде жел турбиасының электр жабдықтарының электр тізбегінде қысқа тұйықталудың пайда болуына әкеледі. Көп жағдайда электр қуатының қысқа тұйықталуы өртке әкелуі мүмкін [11, 775–776–66.].

Электр энергиясын жел турбиасының генераторынан түрлендіргішке беру кезінде электр кабеліндегі қысқа тұйықталу режиміндегі динамикалық процестерді зерттеу мақсатында редукторсыз типтегі жел турбиасының электр жабдықтарындағы қысқа тұйықталу режимдерін теориялық зерттеудің маңыздылығын анықтау; жел турбиасының электромеханикалық бөлігінің математикалық және имитациялық модельдерін жасау; теориялық және

эксперименттік зерттеулер процесінде алынған өтпелі процестерді салыстыру арқылы имитациялық модельдің сәйкестігін бағалауды орындау қажет.

Материалдар мен әдістері

Редукторсыз типті жел турбинасының роторымен құрылатын аэродинамикалық қуат P_a теңдеуі келесі түрде болады:

$$P_a = C_p(z) \frac{\rho S V^3}{2} \quad (1)$$

мұндағы: $C_p(Z)$ – жел энергиясын пайдалану коэффициенті; ρ – ауа тығыздығы; S – турбина қалақтарының бағаланатын жиынтық ауданы; V – желдің жылдамдығы.

Ротормен құрылатын момент (2) теңдеумен анықталады:

$$M_a = \frac{P_a}{\omega} \quad (2)$$

мұндағы ω – ротор білігінің бұрыштық жылдамдығы.

Генератор білігіндегі моменттердің тепе-теңдік теңдеуі келесі теңдеумен сипатталады:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_a - M_{эм} - M_c \quad (3)$$

мұндағы J – инерция моменті; $M_{эм}$ – генератордың электромагниттік моменті; M_c – үйкелісті және басқа шығындарды ескеретін жоғалтулардың кедергі моменті.

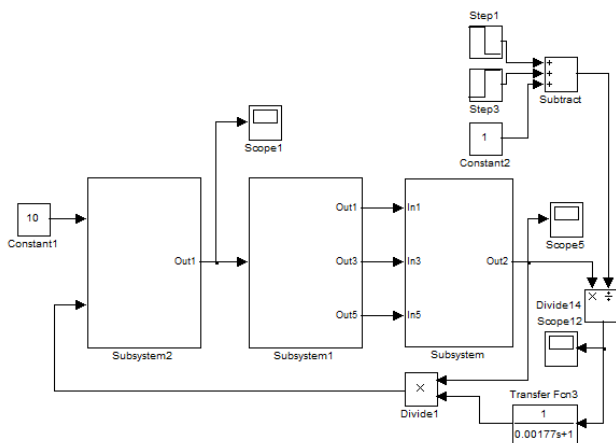
Тұрақты магниттері бар үш фазалы генератордың математикалық моделін құру кезінде келесі болжамдар қабылданды: өндірілетін электр энергиясының кернеулерінің амплитудалық мәндері, сондай – ақ үш фазаның белсенді кедергісі мен индуктивтілігінің шамалары бірдей.

Тұрақты магниттері бар үш фазалы генератордың теңдеулер жүйесі келесі түрде жазылады:

$$\begin{cases} U_{(A,B,C)} = e_{(A,B,C)} - R_A i_{(A,B,C)} - L_A \frac{di_{(A,B,C)}}{dt} \\ e_A = k\omega \sin(2p\omega t) \\ e_B = k\omega \sin\left(2p\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \\ e_C = k\omega \sin\left(2p\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases}$$

мұндағы: $e(A,B,C)$ – генератор орамасының әр фазасында қозғалатын электр қозғаушы күш; $i(A,B,C)$ – генератордың фазалық орамасының тогы; R_A, L_A – генератордың фазалық орамасының белсенді кедергісі және индуктивтілігі; $U_{A,B,C}$ – генератордың шығыс қысқыштарындағы фазалық кернеу; k – конструктивті тұрақты; $2p$ – полюс жұптарының саны.

Жел турбинасындағы динамикалық процестерге теориялық зерттеулер жүргізу мақсатында 1-4 теңдеулер негізінде жел турбинасының электромеханикалық бөлігінің имитациялық моделі жасалды. Имитационды модельдеу MATLAB қолданбалы бағдарламалар пакетін қолдана отырып жасалған (1 сурет).



1-сурет – Жел турбинасының имитационды моделі

Имитационды модельді әзірлеу барысында келесі болжамдар қабылданды - жел турбинасының электромеханикалық бөлігіндегі динамикалық процестерді зерттеу кезінде бүкіл эксперимент жүргізілген уақыт аралығында жылдамдықтың шамасы тұрақты болды. Жел жылдамдығының шамасы Constant 1 блогының параметрлерімен берілген.

Ротордың бұрыштық жылдамдығының, түзеткіш шығысындағы кернеудің және жүктеме тогының динамикалық өзгерістері Scope 1, Scope 5 және Scope 12 осциллографтары осциллографтары көмегімен жүзеге асырылды.

Имитационды модельдеу сәйкестігі екі технологиялық режимде, яғни жел турбинасының үдеткіш режимінде және Subsystem басқарылмайтын екі жартылай периодты үш фазалы түзеткіштің шығысындағы жүктеме

кедергісінің сатылы өзгеру режимінде бағаланды. Жел жылдамдығының шамасы Constant 1 блогының параметрлерімен берілген.

Жел турбинасының генератордың электр жүктемесінің сатылы әсеріне реакциясы блоктармен модельденеді-Constant 2, Step 1, Step 3 және Subtract.

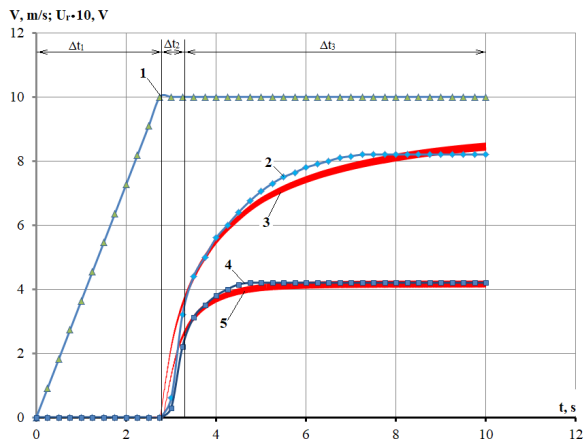
Генератордың электрлік жүктемесіне сатылы әсер ету кезіндегі жел турбинасының реакциясы Constant 2, Step 1, Step 3 и Subtract модельдеу блоктары арқылы жүзеге асырылады. Жүктеме кедергісін ескере отырып, генератордың жүктеме тогы Divide 14 блогымен модельденеді. Функционалды аяқталған модель блоктарына тасымалдау ережелерін қолдана отырып - генератордың статор орамаларының үш фазасының әрқайсысының инерциясын модельдейтін инерциясыз екі жартылай периодты үш фазалы түзеткіш және аперидотты буын Transfer Fcn 3 блогымен модельденеді.

Үш фазалы екі жартылай периодты түзеткіштің жұмыс ерекшелігі - оның коммутациялық қасиеттері болып табылады, оған үш фазалы кернеу көзінің үш фазасының әрқайсысы арасында жүктемені кезекпен қосу жатады. Осыған байланысты Transfer Fcn 3 аперидотты буыны әр фазаға кезектесіп қосылады. Қысқа тұйықталу режимінде пайда болатын электр доғасы негізінен жылу процестерімен сипатталатындықтан, бұл жағдайда жүктеме тек белсенді компонент болып табылады. Жүктеме арқылы тұтынылатын электр қуатының шамасы Divide 1 блогымен есептелді. Жүктеме арқылы тұтынылатын Р қуатының белсенді шамасы $P=U_i$ өрнегінен есептелді, мұндағы U және i үш фазалы екі жартылай периодты түзеткіштің жүктеме кернеуі мен тогы, ол генератордың электрлік қуат тізбегінде орналасқан Subsystem блогы.

Жел турбинасының механикалық бөлігінің имитациялық моделін құру мақсатында (3) теңдеу интегралды түрде бейнеленген. Ротордың имитациялық моделі 1 суретте көрсетілген Subsystem 2 блогымен ұсынылған.

Сәйкестікті бағалау жел турбинасының бос жүріс үдеткіші процесінде (2 және 3 осциллограммалар) және жүктеме кезінде (4 және 5 осциллограммалар) өтпелі процестерді салыстыру арқылы жүзеге асырылды (2 сурет).

Δt_1 уақыт аралығында асинхронды электр қозғалтқышы M және басқарылатын A1 жиілік түрлендіргіші арқылы желдің жылдамдығын 10 м/с дейін сызықтық заңы бойынша арттыру жүзеге асырылды. Осы уақыт аралығында жел турбинасы механикалық түрде тежелді. Δt_2 және Δt_3 уақыт аралықтарында жел ағынының жылдамдығы өзгеріссіз қалды. Тежелу тоқтағаннан кейін жел турбинасы үдетілді. Тәжірибе арқылы алынған жел турбинасының үдеткіш өтпелі процестері бос жүріс кезінде (2 позиция) және жүктеме кезінде (4 позиция) 2 суретте көрсетілген.



2-сурет–Жел турбинасын үдету кезіндегі өтпелі процесстер

Нәтижелер және талқылау

Имитационды модельдеу сәйкестігін бағалау мақсатында (1 сурет) жел жылдамдығы мен жүктеме шамасының ұқсас мәндері үшін имитациялық эксперименттер орындалды. Имитационды эксперименттер процесі кезінде алынған жел турбинасын үдету өтпелі процестері, бос жүріс кезінде (3 позиция) және жүктеме кезінде (5 позиция) 2 суретте көрсетілген. Желдің жылдамдығы 10 м/с – қа жеткеннен кейін Δt_2 уақыт аралығында жел турбинасы тежелуден босатылды да бұрыштық жылдамдықтың өсуі басталды, нәтижесінде түзеткіштің шығысындағы кернеу артты. Бұл аралықта басқарылмайтын үш фазалы түзеткіштің шығыс қысқыштарындағы кернеудің өтпелі процесінің қателігінің максималды мәні (3 позиция, 2 сурет) 18 %-дан аспайды, ал жүктеме кезінде 10 %-дан аспайды. Жел турбинасының үдеуінің бастапқы кезеңіндегі қатенің артуы Subsystem 2 (1 сурет) моделінде Жел энергиясын пайдалану коэффициентінің шамасының жел турбинасының бұрыштық айналу жылдамдығына тәуелділігінің болмауымен түсіндіріледі. Модельде жел энергиясын пайдалану коэффициентінің еі тиімді мәні қолданылады. Δt_3 уақыт аралығында модельдеу қателігі 3 %-дан аспайды, ал жүктеме кезінде 1,5 % құрайды, бұл инженерлік есептеулерге қойылатын талаптарды толығымен қанағаттандырады.

Қаржыландыру туралы ақпарат

Ғылыми жұмысты Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитеті қаржыландырды, ЖТН №AP19677354 «Жел электр станцияларының асинхронды генераторларын жанама жылудан қорғау жүйелерін әзірлеу» жобасы шеңберінде орындалды.

Қорытынды

Қуаты 40 кВт-қа дейінгі жел турбиналарындағы қысқа тұйықталу режимін зерттеудің маңыздылығы апатсыз жұмыс істеу мерзімінің өсуімен мен пайдалану шығындарының төмендеуі арқылы анықталады. Теориялық зерттеулер барысында жел турбинасының математикалық және имитациялық модельдері әзірленді. Турбинаның үдеткіш режимдеріндегі өтпелі процестерді салыстыру арқылы имитациялық модельдің сәйкестігін бағалау жүргізілді. Имитациялық модельдеу нәтижелерінің қателігі, басқарушы және қоздырушы әсерлердің ұқсас мәндері үшін эксперименталды түрде алынған нәтижелерге қатысты, 10%-дан аспады. Теориялық және эксперименттік жолмен алынған өтпелі процестердің салыстыру нәтижелері негізінде, қысқа тұйықталу режимдерін зерттеу үшін имитациялық модельді қолдануға болады деген тұжырым жасауға болады.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

1 Kaverin, V., Nurmaganbetova, G., Em, G., Issenov, S., Tatkeyeva, G., Maussymbayeva, A. Combined Wind Turbine Protection System / *Energies* 2024, 17(20). – 5074. – <https://doi.org/10.3390/en17205074>. Published: 12 (Access date 12 October 2024)

2 **Поваров, А. И.** Возобновляемые источники энергии: Ветроэнергетика. – М. : Энергоатомиздат, 2017. – 296 с.

3 **Heier, S.** Grid Integration of Wind Energy: Onshore and Offshore Conversion Systems. – 4th ed. – Wiley.– 2014. – 320 p.

4 **Мещеряков, А. Н., Черепанов, А. Н.** Ветроэнергетические установки: конструкция, расчёт и проектирование. – СПб. : Питер. – 2020. – 352 с.

5 **Hoen, B., Firestone, J., Rand, J.** Attitudes of U. S. Wind Turbine Neighbors: Analysis of a Nationwide Survey // *Energy Policy*. Volume 134 – November, 2019. – P. 1/27-27/27/.

6 **Bórawski, P., Beldycka-Bórawska, A., Jankowski, K. J., Dubis, B., Dunn, J. W.** Development of wind energy market in the European Union. *Renewable Energy*. – Volume 161. – (December 2020). – P. 691–700/

7 **Williamsa, E., Hittingerb, E., Carvalhoa, R., Williamsa, R.** Wind power costs expected to decrease due to technological progress. *Energy Policy*. *Energy Policy*. – 106 (2017) – P. 427–435.

8 **Li, D., Sang, Y., Lv, Z., Wu, K., Lai, Z.** Dynamic response analysis of wind turbine tower with high aspect ratio: Wind tunnel tests and CFD simulation. *Thin-Walled Structures*. Volume 211. – June 2025. – Article number 113–113.

9 **Li, W., Zhao, W., Li, J., Zhu, Q., Du, Y.** Investigation on vibration behavior of onshore wind turbine tower based on long-term monitoring data // *Journal of*

Renewable and Sustainable Energy. Volume 17, Issue 21, March 2025, Article number 023303

10 Xue, Z., Zhou, Z., Lai, H., Shao, S., Rao, J., Li, Y., He, L., Jia, Z. Investigations on rigid-flexible coupling multibody dynamics of 5 MW wind turbine. *Energy Science and Engineering*. Volume 12. – Issue 10. – P. 4566 – 4581. – October 2024.

11 Restás, Á., Lublóy, É. The effects causing the burning of plastic coatings of fire-resistant cables and its consequences. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* Volume 139. – Issue 2 – P. 775 – 7871 – January 2020.

REFERENCES

1 Kaverin, V., Nurmaganbetova, G., Em, G., Issenov, S., Tatkeyeva, G., Maussymbayeva, A. Combined Wind Turbine Protection System // *Energies*. – 2024. – 17(20). – 5074. <https://doi.org/10.3390/en17205074>. (Access date 12 October 2024)

2 Povarov, A. I. *Vozobnovljajemye istochniki jenergii: Vetro-jenergetika* [Renewable Energy Sources: Wind Energy]. – M.: Jenergoatomizdat, 2017. – 296 p.

3 Heier, S. *Grid Integration of Wind Energy: Onshore and Offshore Conversion Systems*. – 4th ed. – Wiley, 2014. – 320 p.

4 Meshherjakov, A. N., Cherepanov, A. N. *Vetrojenergeticheskie ustanovki: konstrukcija, raschjot i proektirovanie* [Wind Power Plants: Design, Calculation, and Engineering]. – SPb.: Piter, 2020. – 352 p.

5 Hoen, B., Firestone, J., Rand, J. Attitudes of U.S. Wind Turbine Neighbors: Analysis of a Nationwide Survey. *Energy Policy*. Volume, November 2019. P. 1/27-27/27/.

6 Bórawski, P., Beldycka-Bórawska, A., Jankowski, K. J., Dubis, B., Dunn, J. W. Development of wind energy market in the European Union. *Renewable Energy*. Volume 161 (December 2020) P. 691–700

7 Williamsa, E., Hittingerb, E., Carvalhoa, R., Williamsa, R. Wind power costs expected to decrease due to technological progress. *Energy Policy*. *Energy Policy*. 106 (2017) P. 427–435

8 Li, D., Sang, Y., Lv, Z., Wu, K., Lai, Z. Dynamic response analysis of wind turbine tower with high aspect ratio: Wind tunnel tests and CFD simulation. *Thin-Walled Structures*. Volume 211, June 2025, Article number 113113.

9 Li, W., Zhao, W., Li, J., Zhu, Q., Du, Y. Investigation on vibration behavior of onshore wind turbine tower based on long-term monitoring data. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*. Volume 17, Issue 21, March 2025, Article number 023303

10 Xue, Z., Zhou, Z., Lai, H., Shao, S., Rao, J., Li, Y., He, L., Jia, Z. Investigations on rigid–flexible coupling multibody dynamics of 5 MW wind turbine. Energy Science and Engineering. Volume 12, Issue 10, P. 4566 – 4581, October 2024.

11 Restás, Á., Lublóy, É. The effects causing the burning of plastic coatings of fire-resistant cables and its consequences. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry Volume 139, Issue 2, P. 775 – 7871, January 2020.

30.06.25 ж. баспаға түсті.

08.07.25 ж. түзетулерімен түсті.

05.09.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

*Г. С. Нурмаганбетова¹, В. В. Каверин², Г. А. Эм³,

С. С. Исенов⁴, В. М. Дружинин⁵

^{1,4}Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, Республика Казахстан, г. Астана;

^{2,3}Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, Республика Казахстан, г. Караганда;

⁵Карагандинский индустриальный университет, Республика Казахстан, г. Темиртау.

Поступило в редакцию 30.06.25.

Поступило с исправлениями 08.07.25.

Принято в печать 05.09.25.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ЧАСТИ ВЕТРОВОЙ ТУРБИНЫ

На фоне стабильного увеличения доли ветроэнергетики в структуре энергоснабжения особую значимость приобретают исследования, направленные на повышение надёжности ветровых турбин, в частности безредукторных конструкций. Безредукторные турбины отличаются упрощённой механической схемой и сниженным уровнем эксплуатационных затрат, однако они более чувствительны к колебаниям внешней нагрузки и динамическим воздействиям. В статье обоснована необходимость проведения исследований коротких замыканий в силовой части генератора ветровых турбин. Реализован и обоснован выбор уравнений математической модели электромеханической части ветровой турбины мощностью до 40 кВт. Для исследования динамических процессов при коротком

замыкании разработаны математическая и имитационная модели электромеханической части ветровой турбины в пакетах прикладных программ MATLAB/Simulink. Имитационная модель включает учёт моментов инерции, сопротивлений и коммутационных свойств трёхфазного двухполупериодного выпрямителя. Проведено сопоставление переходных процессов, полученных теоретически и экспериментально, при различных режимах работы: на холостом ходу и под нагрузкой. Установлено, что максимальная погрешность моделирования не превышает 10 % на начальных этапах разгона и снижается до 1,5 % в установившемся режиме, что подтверждает адекватность модели для инженерных расчётов и анализа режимов короткого замыкания.

Ключевые слова: ветровая турбина, короткое замыкание, имитационное моделирование, имитационная модель, переходные процессы, трёхфазный выпрямитель.

*G. S. Nurmaganbetova¹, V. V. Kaverin², G. A. Em³,

S. S. Issenov⁴, V. M. Druzhinin⁵

^{1,4}Kazakh Agrotechnical Research University named after S. Seifullin, Republic of Kazakhstan, Astana;

^{2,3}Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Republic of Kazakhstan, Karaganda;

⁵Karaganda Industrial University, Republic of Kazakhstan, Temirtau.

Received 30.06.25.

Received in revised form 08.07.25.

Accepted for publication 05.09.25.

MATHEMATICAL AND SIMULATION MODELING OF SHORT-CIRCUIT MODES IN THE ELECTROMECHANICAL PART OF A WIND TURBINE

Against the backdrop of a steady increase in the share of wind energy in the energy supply structure, research aimed at improving the reliability of wind turbines, particularly gearless designs, is becoming increasingly important. Gearless turbines have a simplified mechanical design and lower operating costs, but they are more sensitive to external load fluctuations and dynamic effects. The article substantiates the need to conduct research on short circuits in the power part of wind turbine generators. The choice of equations for the mathematical model of the electromechanical part of a wind turbine with a capacity of up to 40 kW has been implemented and

justified. To study dynamic processes during a short circuit, a mathematical and simulation model of the electromechanical part of a wind turbine was developed using MATLAB/Simulink software packages. The simulation model takes into account the moments of inertia, resistances, and switching properties of a three-phase half-wave rectifier. The transient processes obtained theoretically and experimentally were compared under different operating modes: at idle speed and under load. It has been established that the maximum modeling error does not exceed 10 % in the initial stages of acceleration and decreases to 1.5 % in the steady-state mode, which confirms the adequacy of the model for engineering calculations and analysis of short-circuit modes.

Keywords: wind turbine, short circuit, simulation modeling, simulation model, transients, three-phase rectifier.

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