

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 (2024)

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/FYZZ1289>

Бас редакторы – главный редактор

Талипов О. М.

доктор PhD, ассоц. профессор (доцент)

Заместитель главного редактора

Калтаев А.Г., *доктор PhD*

Ответственный секретарь

Сағындық Ә.Б., *доктор PhD*

Редакция алкасы – Редакционная коллегия

Клецель М. Я.,	<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>
Омарова А. Р.	<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

<https://doi.org/10.48081/MVC13135>

***Г. С. Нұрмағанбетова¹, В. В. Каверин², С. С. Исенов³,
У. К. Искаков⁴, Э. К. Сарсембиева⁵**

^{1,3,5}С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Қазақстан Республикасы, Астана қ.

²Абылқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қазақстан Республикасы, Қарағанды қ.,

⁴ЖШС «KAZ MINERALS» Ақтоғай., Қазақстан Республикасы, Ақтоғай қ..

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

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

³ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4576-4621>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6395-6067>

⁵ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-7078-4236>

*e-mail: g_sahitovna@mail.ru

ҚЫСҚА ТҰЙЫҚТАЛҒАН РОТОРЛЫ АСИНХРОНДЫ ГЕНЕРАТОРДЫҢ ТЕМПЕРАТУРАНЫ БАҚЫЛАУШЫНЫҢ ИМИТАЦИОНДЫ МОДЕЛІН ӘЗІРЛЕУ

Мақалада қысқа тұйықталған роторы бар асинхронды генератордың электромеханикалық түрлендіргішті температураның жоғарылауынан жанама қорғау жүйесі қарастырылған. Статор орамаларының қызып кетуінен қорғаудың жанама жүйесін құру үшін температураны бақылаушы жасалды және оның жұмыс алгоритмі әзірленді. Температураны бақылаушының алгоритмін зерттеу үшін қысқа тұйықталған роторы бар асинхронды генератордың электромеханикалық түрлендіргішінің имитационды моделі құрылды. Имитационды зерттеулер MATLAB/SIMULINK және SimPowerSystems қолданбалы бағдарламалар пакеттерінде орындалды. Нәтижесінде қысқа тұйықталған роторы бар асинхронды генератордың электромеханикалық түрлендіргіші үшін статор орамасының кедергісін бақылаушы моделінің қателігінің $3 \text{ кВт} \div 200 \text{ кВт}$ қуат диапазонындағы температурадан асып кетуіне тәуелділігі талданды. Бақылаушының температурасын есептеу дәлдігін арттыру мақсатында түзету коэффициенті

енгізіліп, оның асинхронды генератордың электромеханикалық түрлендіргішінің қуат функциясына тәуелділігі анықталды. Түзету коэффициентін ескере отырып, асинхронды генератордың электромеханикалық түрлендіргішінің температурасын жанама есептеу қателігі 1% - дан аспайды. Ұсынылған температура бақылаушы қысқа тұйықталған роторы бар асинхронды генератордың электромеханикалық түрлендіргіштің қорғанысын құру үшін қолданылады. Қысқа тұйықталған роторы бар асинхронды генератордың электромеханикалық түрлендіргішті қызып кетуден қорғау үшін температура бақылаушысын құру принципі ұсынылды.

Кілтті сөздер: электромеханикалық түрлендіргіш, имитационды модель, жылу қорғанысы, генератор, статор, температура.

Кіріспе

Кез-келген технологиялық жабдықты пайдаланудың ең жақсы режимі номиналды паспорттық режим болып табылады, ал іс жүзінде технологиялық процестердің ерекшеліктеріне байланысты номиналды паспорт режимінде жұмыс өте сирек кездеседі. Бұл фактор ауыр жұмыс жағдайларымен сипатталатын көптеген өнеркәсіп салаларда ерекше маңызға ие, олар жиі іске қосылатын, жүктемелердің кең ауқымында өзгеретін және тұрақты шамадан тыс жүктемелермен стационарлық емес жұмыс режимдерімен бірге жүреді. Мұндай технологиялық қондырғылардың басым көпшілігінде қозғалыстың негізгі көзі ретінде қысқа тұйықталған роторы (ҚТР) бар асинхронды генератордың (АГ) электромеханикалық түрлендіргіші (ЭТ) қолданылады, ал ең маңыздысы – ЭТ-нің шамадан тыс жүктеме бөлгіштерімен жұмысы, бұл генератордың қызып кетуіне әкеледі және оның апаттық істен шығу ықтималдығын едәуір арттырады.

Асинхронды генератордың ЭТ жылу режимін диагностикалауға бағытталған қолданыстағы техникалық шешімдер іс-әрекет принципі, физикалық іске асырылуы, жылдамдығы және селективтілігі бойынша ерекшеленеді. Бұл ретте ҚТР бар АГ ЭТ құрылымына арнайы сезбектерді орнатуды талап етпейтін, бірақ температурадан асып кетудің жанама белгілерін емес, ҚТР бар АГ ЭТ жылу режимін тікелей айқындайтын жанама әдістер перспективалы болып табылады.

Демек, статор кедергісін сәйкестендіру әдістерімен анықтауға негізделген жылу шығаруды және жылу бөлуді ескеретін ҚТР бар АГ ЭТ жанама жылу қорғауға арналған зерттеулер ғылыми жаңалыққа ие.

Соңғы жылдары Қазақстанда зияткерлік сезбектер дамуда [1]. Сымсыз сезбектердің келешегі бары сөзсіз. Кеңістікте бөлінген қозғалмалы нысандар олардың контроллерлерімен, автоматика құралдарымен сымсыз байланысты

кажет етеді [2]. Бірақ олардың кемшілігі оларды кейбір өндірістер мен өнеркәсіптер жағдайында орнатуға және пайдалануға жол бермеу болып табылады.

Мақала авторлары [3] берілген шектерде температураның табылуын бақылауды жүзеге асыратын индуктивті өлшеу түрлендіргішін ұсынады. Алайда бұл тәсіл әдетте іске қосу қашықтығының пайыздық мөлшеріне әкеледі және оның шамамен 10 % жетеді.

Шамадан тыс жүктеме режимін анықтау және жою үшін, сондай-ақ **ҚТР бар АГ ЭТ** қызып кетуінен статор тогының уақытқа интегралды тәуелділігі функциясындағы қорғаныс қолданылады [4–7]. Бұл әдіс статор орамаларының қызу температурасын бақылауға, сондай-ақ қатарынан бірнеше рет іске қосудан туындаған орамалар қызып кеткен жағдайда генераторды өшіруге мүмкіндік бермейді.

Мақалада [8] авторлар температураның өзгеруіне байланысты орам импедансының белсенді және/немесе реактивті компоненттерінің өзгеруіне негізделген термиялық қорғаныс әдісін ұсынады, бұл фазалық кернеулер мен токтардың векторлары арасындағы бұрыштың сәйкес өзгеруіне әкеледі. Әдістің кемшілігі мынада: қоршаған ортаның температурасын қоса алғанда, пайдалану жағдайларына байланысты **ҚТР бар АГ ЭТ** жылу таратудың әртүрлі нұсқалары ескерілмейді.

Осылайша, қазіргі уақытта қысқа тұйықталған (КЗР) АГ-ды қызып кетуден қорғаудың қолданыстағы әдістері көптеген жағдайларда бірқатар кемшіліктерге ие, өйткені олар пайдалану жағдайларына байланысты **ҚТР бар АГ ЭТ** жылу таратудың әртүрлі нұсқаларын ескермейді немесе температураны бақылаудың қажетті дәлдігін қамтамасыз етпейді.

Мұның бәрі асинхронды генераторларға арналған жанама әдістерге негізделген қорғаныс жүйелерін әзірлеу бойынша зерттеу жүргізу орынды деп айтуға мүмкіндік береді.

Материалдар және әдістері

Теориялық зерттеулердің мақсаты – жылу шығару және жылу бөлу процестерін ескеретін қысқа тұйықталған роторы бар асинхронды генератордың электромеханикалық түрлендіргішінің жанама жылу қорғанысының имитациялық моделін жасау.

Қойылған мақсаттарға жету үшін генератор режиміндегі қысқа тұйықталған роторы бар асинхронды генератордың электромеханикалық түрлендіргішінің векторлық математикалық моделі негізінде температураны бақылаушының имитациялық моделін әзірлеу ұсынылады [9,10].

Жел генератор қондырғысының асинхронды генераторының жанама температуралық қорғанысын құру үшін ($\omega k=0$, $\alpha k=0$) қозғалмайтын координаталар жүйесінде ҚТР АГ математикалық моделі негіз ретінде

алынды. Онда нақты ось α , ал жорамал β арқылы белгіленеді. Бұл жағдайда кеңістік векторлар $\underline{u}_s = u_{s\alpha} + j u_{s\beta}$, $\underline{i}_s = i_{s\alpha} + j i_{s\beta}$, $\underline{\psi}_s = \psi_{s\alpha} + j \psi_{s\beta}$ осьтер бойымен орналасады және теориялық ережелер негізінде құрылған сызықтық емес дифференциалдық теңдеулер жүйесі төменде көрсетілген (1) теңдеулер жүйесімен сипатталады:

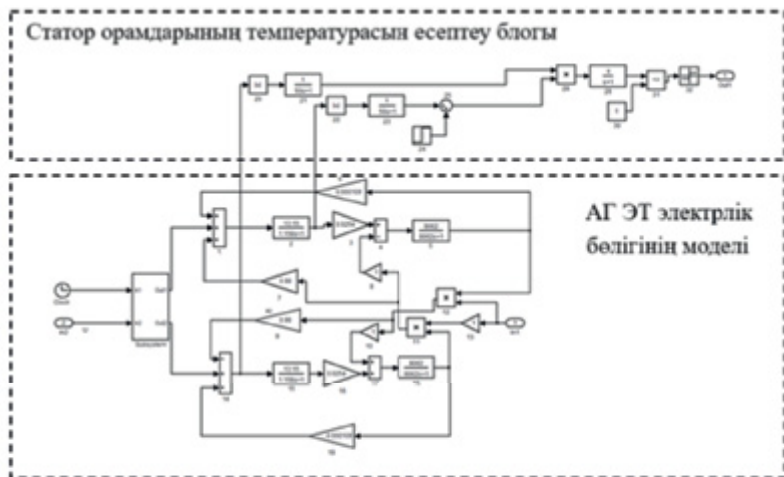
$$\left. \begin{aligned} u_{s\alpha} &= R_s (1 + \overline{\tau'_s s}) i_{s\alpha} - \frac{k_R}{\tau_R} \psi_{R\alpha} - k_R p \omega \psi_{R\beta}, \\ u_{s\beta} &= R_s (1 + \overline{\tau'_s s}) i_{s\beta} - \frac{k_R}{\tau_R} \psi_{R\beta} + k_R p \omega \psi_{R\alpha}, \\ 0 &= -k_R R_R i_{s\alpha} + \frac{1}{\tau_R} (1 + \overline{\tau_R s}) \psi_{R\alpha} + p \omega \psi_{R\beta}, \\ 0 &= -k_R R_R i_{s\beta} + \frac{1}{\tau_R} (1 + \overline{\tau_R s}) \psi_{R\beta} - p \omega \psi_{R\alpha}, \\ M &= k_R (\psi_{R\alpha} i_{s\beta} - \psi_{R\beta} i_{s\alpha}), \\ \overline{T}_m s \omega &= M - M_L. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

мұнда $u_{s\alpha}$ – (α , β) қозғалмайтын координаталар жүйесіндегі α нақты осьіне статор кернеуінің кеңістіктік векторының проекциясы; $u_{s\beta}$ – (α , β) қозғалмайтын координаталар жүйесіндегі β жорамал осьіне статор кернеуінің кеңістіктік векторының проекциясы; $i_{s\alpha}$ – (α , β) қозғалмайтын координаталар жүйесіндегі α нақты осьіне статор тогының кеңістіктік векторының проекциясы; $i_{s\beta}$ – (α , β) қозғалмайтын координаталар жүйесіндегі β жорамал осьіне статор тогының кеңістіктік векторының проекциясы; $\psi_{R\alpha}$ – (α , β) қозғалмайтын координаталар жүйесіндегі α нақты осьіне ротор ағынының кеңістіктік векторының проекциясы; $\psi_{R\beta}$ – (α , β) қозғалмайтын координаталар жүйесіндегі β жорамал осьіне ротор ағынының кеңістіктік векторының проекциясы; R_s – статор орамасының кедергісі, Ом; R_R – ротор орамасының кедергісі, Ом; s – Лаплас операторы; M – ЭТ электр магниттік моменті, Н•м; M_L – ҚТР бар АГ ЭТ білігінің жүктеме моменті, Н•м; ω – бұрыштық жылдамдық, рад/с; p – полюс жұптарының саны;

$\overline{\tau'_s} = \frac{x'_s}{R_s}$, $\overline{\tau_R} = \frac{x_R}{R_R}$, $k_R = \frac{x_m}{\tau_R}$ өлшемсіз коэффициенттер; $\overline{T}_m = \frac{J \omega_b^2}{M_b}$, $x'_s = \frac{\omega_b L_s}{R_s}$, $x_R = \frac{\omega_b L_R}{R_R}$, $x_m = \frac{\omega_b L_m}{R_s}$, – салыстырмалы параметрлер; L_s – статор орамасының индуктивтілігі, Гн; L_R – ротор орамасының индуктивтілігі, Гн; L_m – статор мен ротор орамаларының өзара индуктивтілігі, Гн; J – ЭТ механикалық бөлігінің инерция моменті, кг•м²; ω_b – ЭТ білігіндегі моменттің базалық мәні, Н•м; ω_b – бұрыштық жылдамдықтың номиналды мәні, рад/с.

Имитациялық зерттеулер 4А сериялы генераторлық жұмыс режиміндегі қысқа тұйықталған роторы бар асинхронды генератордың ЭТ үшін орындалды. Зерттеулер айналу жиілігі 750 айн/мин және қуаты 3 кВт-тан 200 кВт-қа дейінгі температуралар диапазонында $20^{\circ}\text{C} \div 250^{\circ}\text{C}$ жүргізілді.

Температураны бақылаушының имитациялық моделі (1 сурет) жеке блок түрінде (Статор орамының температурасын есептеу блогы) көрсетілген.



Сурет – 1 Температураны бақылаушының имитациялық моделі

Пайдаланудың техникалық шарттары бойынша АГ ЭТ-дағы жүктеменің жұмыс диапазоны статор орамаларының рұқсат етілген ең жоғары температурасының шамасымен шектелген. Қызып кетуден қорғау құрылғыларын құру үшін $100^{\circ}\text{C} \div 120^{\circ}\text{C}$ диапазонындағы ең төменгі рұқсат етілген температурамен шектелуге болады. Температураның максималды мәні қысқа тұйықталған роторы бар АГ ЭТ орамаларының оқшаулау класымен анықталады (4А сериясы үшін 250°C). Статор орамасының белсенді кедергісі оның температурасына пропорционалды түрде өзгереді.

Температураны бақылаушы ҚТР бар АГ ЭТ электр бөлігінің моделінен және ЭТ статор орамының температурасын есептеу блогынан тұрады.

Генератор режиміндегі ҚТР бар АГ ЭТ жұмысы келесілермен байланысты:

- ЭТ ішіндегі жүктеме параметрлерімен және электромагниттік процестермен;

- статор және ротор орамаларының электромагниттік өзара әрекеттесуімен;

- ҚТР бар АГ ЭТ сырғанау шамасымен.

«АГ ЭТ электрлік бөлігінің моделі» блогымен сызықтық емес дифференциалдық теңдеулерді (1) қолдана отырып, ЭТ кернеуі мен тогының ағымдағы салыстырмалы координаталары есептелінеді.

«Статор орамдарының температурасын есептеу» блогында қуаттың жылу балансының (2) теңдеуімен генератордың статор орамаларының температурасының ағымдағы мәнін есептеу жүзеге асырылады:

$$\begin{aligned} |U| &= \tau_1 \frac{dU_1}{dt} + U_1 + K_1 \\ |i| &= \tau_2 \frac{di_1}{dt} + i_1 + K_2 \\ T &= K_3 U i + K_4 \\ T_1 &= \tau_3 \frac{dT}{dt} + T \end{aligned} \quad (2)$$

мұндағы: U_i – айнамалы кернеу; U_1, i_1 – функция модулімен модельденген және одан кейін тұрақты компонентті бөле отырып екі жартылай периодты түзетуден кейінгі кернеу мен ток; τ_1 және τ_2 – статор орамаларының кернеуі мен тогының тұрақты компонентін бөлу сүзгісінің уақыт тұрақтылары; τ_3 – генератордың жылу инерциясының уақыт тұрақтысы; T және T_1 – генератордың жылу инерциясының статор орамаларының температурасы; K_3 – генератордың қоршаған ортамен жылу алмасуын ескеретін коэффициент.

Статор орамаларының электр магниттік процестерінің моделі белсенді және реактивті компоненттері бар теңдеулерден тұрады. Статор орамаларының температурасын есептеу үшін кернеуге қатысты токтың белсенді компонентінің параметрлері қолданылады.

Сырғанау мәнінің өзгеруі нәтижесінде статор тогының белсенді компоненті өзгереді, ол ЭТ статор орамының қызуын анықтайды.

Статордың белсенді кедергісінің шамасы статор температурасының параметрін есептеу үшін негіз болып табылатын аperiodтық буында (№2 және 15 блоктар) ескеріледі.

Температура бақылаушының кіріс координатасы болып тиісті параметрлердің датчиктерінен алынатын статор кернеуі және бұрыштық жылдамдық табылады. Статор орамалар тогының белсенді құрамдас бөлігінің координаталары және қоректену кернеуі ҚТР АГ ЭТ электр бөлігінің моделінде есептеледі.

Сумматор блогының (№14 блок) және аperiodтық буынның (№2 блок) шығысындағы сигналдар өнеркәсіптік жиіліктің синусоидалы формасына

ие. Статор температурасын анықтау үшін модульдердің мәндері №20 және №22 блоктармен есептеледі. Тұрақты құрамдас бөлікті бөлу №21 және №23 блоктармен бірінші ретті апериодты буынмен жүзеге асырылады. Генераторды іске қосу кезінде нөлге бөлуді есептеу қатесін болдырмау үшін №26 және №24 блоктармен орын ауыстыру енгізіледі. ЭТ статор орамаларының қыздыру температурасына пропорционалды сигнал №29 блок салыстыру элементінің №31 блогының кірісіне түседі, мұнда ол статор орамаларының максималды рұқсат етілген температурасымен (№30 блок) салыстырылады. Шекті элементтің (№32 блок) шығуында температураны қыздырудың рұқсат етілген ең жоғары шамасына жеткенде жүктемені ҚТР бар АГ ЭТ ажырату сигналы қалыптастырылады.

1 және 2 кестелерде 30 кВт және 75 кВт қуаттар үшін 20 °C-ден 250 °C-ге дейінгі температура функциясындағы статор кедергісінің тәуелділігі келтірілген.

Кесте 1 – 30 кВт қуат үшін температура функциясындағы статор кедергісінің тәуелділігі

4А сериялы ҚТР бар АГ ЭТ, W=30 кВт, $\eta=750$ айн./мин					
T, °C	20	125	170	200	250
R_s	0,2654	0,3767	0,4251	0,4567	0,5101
R(t)	0,2764	0,3834	0,4292	0,4598	0,5108
R_k	0,2672	0,3792	0,4279	0,4598	0,5135

Кесте 3 – 75 кВт қуат үшін температура функциясындағы статор кедергісінің тәуелділігі

4А сериялы ҚТР бар АГ ЭТ, W=75 кВт, $\eta=750$ айн./мин					
T, °C	20	125	170	200	250
R_s	0,1018	0,1275	0,140	0,1480	0,1620
R(t)	0,0809	0,1122	0,1256	0,1345	0,1495
R_k	0,0925	0,1159	0,1273	0,1345	0,1473

мұнда R_s – статор кедергісінің шынайы мәні, Ом;

$R_{(t)}$ – бакылаушының көмегімен статор кедергісінің есептелген мәні, Ом;

R_k – түзету коэффициентін ескере отырып, статор кедергісі.

$R_{(t)}$ бакылаушысының көмегімен статор кедергісінің мәнін есептеу үшін 30 кВт және 75 кВт қуаттар үшін 3 – 4 кестелерде келтірілген есептік мәліметтер қолданылады.

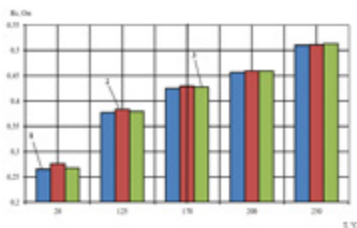
Кесте 3 – Қуаты 30 кВт болатын ҚТР бар АГ статорының кедергісін есептеуге арналған есептік мәліметтер

W=30 кВт, $\eta=750$ айн./мин							
R(20)	α	x_m	x_R	R_R , Ом	R_s , Ом	T, °C	R(t), Ом
0,254	0,004	2,2709	2,3089	0,0013	0,2751	20	0,2764
0,254	0,004	2,2709	2,3089	0,0013	0,3820	125	0,3834
0,254	0,004	2,2709	2,3089	0,0013	0,4279	170	0,4292
0,254	0,004	2,2709	2,3089	0,0013	0,4585	200	0,4598
0,254	0,004	2,2709	2,3089	0,0013	0,5094	250	0,5108

Кесте 4– Қуаты 75 кВт болатын ҚТР бар АГ статорының кедергісін есептеуге арналған есептік мәліметтер

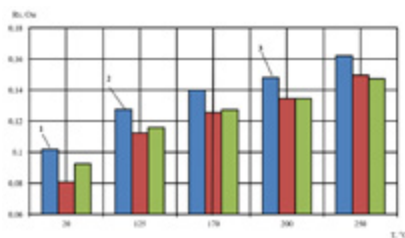
W=75 кВт, $\eta=750$ айн./мин							
R(20)	α	x_m	x_R	R_R , Ом	R_s , Ом	T, °C	R(t), Ом
0,074569	0,004	2,27386	2,309219	0,00038	0,08053452	20	0,0809
0,074569	0,004	2,27386	2,309219	0,00038	0,1118535	125	0,1122
0,074569	0,004	2,27386	2,309219	0,00038	0,12527592	170	0,1256
0,074569	0,004	2,27386	2,309219	0,00038	0,1342242	200	0,1345
0,074569	0,004	2,27386	2,309219	0,00038	0,149138	250	0,1495

Эксперименттердің нәтижелері бойынша статор кедергісінің ҚТР бар АГ ЭТ әртүрлі қуаттары үшін температураға тәуелділігі анықталды. 2 суретте температура функциясындағы статор кедергісінің өзгеру тәуелділіктері көрсетілген: тәуелділік 1 – ҚТР бар АГ ЭТ әрбір қуаты үшін анықтамалық деректерден алынған статор кедергісінің шынайы мәндері, тәуелділік 2 – бақылаушының көмегімен статор кедергісінің есептелген мәндері.



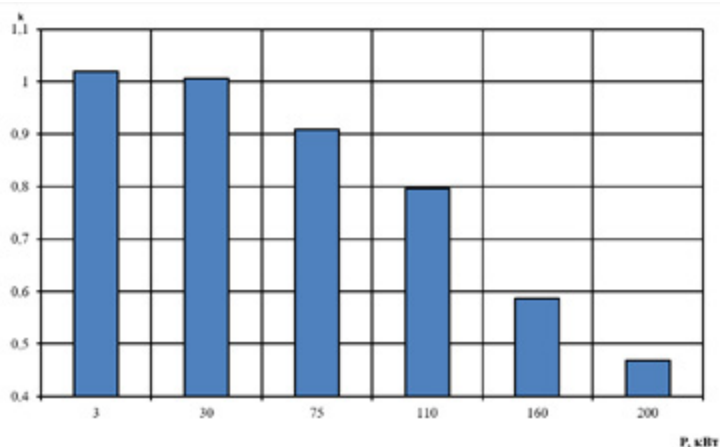
Қуаты 30 кВт

Сурет 1– Имитациялық эксперименттердің нәтижелері



Қуаты 75 кВт

Мыс кедергісінің өзгеруінің температуралық коэффициентін біле отырып, статор мен температураның кедергісі есептеледі. Түзету коэффициентін ескере отырып алынған үшінші тәуелділік, оның тиісті генератор типі үшін сандық мәні 3-суретте көрсетілген тәуелділіктен таңдалады.



Сурет 3 – Түзету коэффициентінің қуатқа тәуелділігі

Алынған нәтижелерден көріп отырғанымыздай, статор орамасының кедергісінің шынайы мәні мен есептелген мән арасында қате бар. Бұл температураны бақылаушының қателігінен туындайды. Бақылаушының қателіктерін түзету үшін түзету коэффициенті енгізілді.

5 кестеде ҚТР бар АГ ЭТ әртүрлі қуаттылықтары үшін 250 °С температурасы кезіндегі түзету коэффициентінің есептеулері келтірілген.

Кесте 5 – Әр түрлі қуаттар үшін түзету коэффициентін есептеу

T, °C	W, кВт	Rs, Ом	R(t), Ом	k
200	3	7,8744	8,0326	1,0200
	30	0,4567	0,4598	1,0067
	75	0,148	0,1345	0,9087
	110	0,1385	0,1102	0,7956
	160	0,0995	0,0584	0,5869
	200	0,0911	0,0426	0,4676

5 кестеге сәйкес қуат функциясындағы түзету коэффициентінің графигі келтірілген (3 сурет).

Алынған графиктен қуаттың жоғарылауымен қатенің мөлшері азаяды деген қорытынды шығады.

Нәтижелер және талқылау

Осылайша, қуат функциясындағы **ҚТР бар АГ ЭТ** жылу балансын ескеретін температураны бақылаушының имитациялық моделі жасалды (1 сурет). Имитациялық эксперименттер процесінде температураны жанама әдіспен есептеу дәлдігін арттыратын түзету коэффициентін енгізу қажеттілігі негізделген (30 блок, 1 сурет). **ҚТР бар АГ ЭТ** қуат функциясындағы температураны бақылаушының түзету коэффициентінің тәуелділігі анықталды.

3 кВт ÷ 200 кВт қуат диапазонында **ҚТР бар АГ ЭТ** үшін статор орамасының кедергісін бақылаушы моделінің қателіктеріне талдау жасалды. 3 суретте көрсетілген **ҚТР бар АГ ЭТ** қуат функциясындағы түзету коэффициентінің тәуелділігі анықталды.

ҚТР бар АГ ЭТ жылу қорғаудың ұсынылған жанама әдісінің ерекшелігі жылу қорғаудың қолданыстағы әдістерінен ерекшеленеді, өйткені ол жылу бөлу мен жылуды әкетуді ескереді (жылу балансының теңдеулер жүйесі 2).

Қаржыландыру туралы ақпарат

Ғылыми жұмысты Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитеті қаржыландырды, ЖТН №АР19677354 «Жел электр станцияларының асинхронды генераторларын жанама жылудан қорғау жүйелерін әзірлеу» жобасы шеңберінде орындалды.

Қорытынды

Жүргізілген зерттеу нәтижесінде:

Қысқа тұйықталған роторы бар асинхронды генератордың электромеханикалық түрлендіргішінің математикалық моделі мен MATLAB қолданбалы бағдарламалар пакеті құралдарының көмегімен қуаттың жылу балансының теңдеулері негізінде зерттеу нәтижелерінің сапалық немесе сандық көрсеткіштерін көрсете отырып температураны бақылаушы моделі әзірленді.

Қуаттың жылу балансының теңдеулер жүйесінде температураны анықтау дәлдігінің жоғарылауын қамтамасыз ететін түзету коэффициенті енгізілді және зерттеу нәтижелерінің сапалық немесе сандық көрсеткіштерін көрсете отырып, **қысқа тұйықталған роторы бар асинхронды генератордың электромеханикалық түрлендіргішінің** қуат функциясына түзету коэффициентінің тәуелділігі анықталды. Бақылаушының **ҚТР бар АГ ЭТ** статор орамаларының температурасын есептеу қателігін анықтау әдістемесі әзірленді.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ДЕРЕКТЕР ТІЗІМІ

1 ABB Ability™ Smart Sensor. Condition monitoring solution for low voltage motors. Service note. ABB, 2017. 4p.

2 Low voltage. General performance motors. – ABB, 2016. – 60 p.

3 **Шаманов Р. С., Перекусихина И. А.** Индуктивный первичный измерительный преобразователь заданного значения температуры. Интернет-журнал «Науковедение». Вып. 3, 2014г. С. 1–8.

4 DS18B20 – датчик температуры с интерфейсом 1-Wire – [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://mypractic.ru/ds18b20-datchik-temperatury-s-interfejsom-1-wire-opisanie-na-russkom-yazyke.html> (Дата последнего обращения 23-09-2024).

5 **Martin W., Eason A., Patel A.G.** Low Voltage Motor Protection. – Rockwell Automation, 2016. – 30 p.

6 **Киреева Э.А., Цырук С.А.** Релейная защита и автоматика электроэнергетических систем. – М. : Академия, 2013. – 288 с.

7 **Plesca Adrian T.** Thermal Analysis of Overload Protection Relays using Finite Element Method // Indian Journal of Science and Technology. – 2013. – Vol. 6. – Iss. 8. – P. 5120–5125.

8 **Yurieva E.Y., Shayda V.P., Patsula A.F.** Verification of adequacy of graphic method of determining the final temperature of induction motor heating // Material of International scientific conference MicroCAD. – Kharkov: NPP CHP «Technological Center», 2011. – P. 58–61.

9 **Enany T. A., Mostafa M. A. and Othman E. S.,** «Direct Current Signal Injection Enhanced with Artificial Intelligence Technique for Asynchronous Motors Thermal Monitoring,» 2018 Twentieth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON), Cairo, Egypt, 2018, P. 828–833, doi: 10.1109/MEPCON.2018.8635124.

10 **Фираго, Б. И.** Векторные системы управления электроприводами: учеб. пособие / Б. И. Фираго, Д. С. Васильев – Минск : Выш. шк. , 2016. – 159 с.

REFERENCES

1 ABB Ability™ Smart Sensor. Condition monitoring solution for low voltage motors. Service note. ABB, 2017. 4 p.

2 Low voltage. General performance motors. – ABB, 2016. – 60 p.

3 **Shamanov R. S., Perekusihina I. A.** Induktivnyj pervichnyj izmeritel'nyj preobrazovatel' zadannogo znacheniya temperatury [Inductive temperature setpoint sensor] [Text]. Internet-zhurnal «Naukovedenie». Vol. 3, 2014g. P. 1–8.

4 DS18B20 – datchik temperatury s interfejsom 1-Wire [DS18B20 – temperature sensor with 1-Wire interface] – [Elektronnyj resurs] – Rezhim dostupa: <http://mypractic.ru/ds18b20-datchik-temperature-s-interfejsom-1-wire-opisanie-na-russkom-yazyke.html> (data poslednego obrashcheniya 23-09-2024).

5 **Martin W., Eason A., Patel A. G.** Low Voltage Motor Protection. – Rockwell Automation, 2016. – 30 p.

6 **Kireeva E. A., Cyruk S. A.** Relejnaya zashchita i avtomatika elektroenergeticheskikh sistem [Relay protection and automation of electrical power systems]. – M.: Akademiya, 2013. – 288 p.

7 **Plesca Adrian T.** Thermal Analysis of Overload Protection Relays using Finite Element Method // Indian Journal of Science and Technology. – 2013. – Vol. 6. – Iss. 8. – P. 5120–5125.

8 **Yurieva E. Y., Shayda V. P., Patsula A. F.** Verification of adequacy of graphic method of determining the final temperature of induction motor heating // Material of International scientific conference MicroCAD. – Kharkov: NPP CHP «Technological Center», 2011. – P. 58–61.

9 **Enany T. A., Mostafa M. A. and Othman E. S.**, «Direct Current Signal Injection Enhanced with Artificial Intelligence Technique for Asynchronous Motors Thermal Monitoring,» 2018 Twentieth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON), Cairo, Egypt, 2018, P. 828–833, doi: 10.1109/MEPCON.2018.8635124.

10 **Firago, B. I.** Vektornyye sistemy upravleniya elektropriivodami [Vector control systems for electric drives]. Ucheb. posobie / B. I. Firago, D. S. Vasil'ev – Minsk : Vysh. shk. , 2016. – 159 p.

22.10.24 ж. баспаға түсті.

26.11.24 ж. түзетулерімен түсті.

04.12.24 ж. басып шығаруға қабылданды.

*Г. С. Нурмаганбетова¹, В. В. Каверин², С. С. Исенов³,

У. К. Исаков⁴, Э. К. Сарсембиева⁵

^{1,3,5}Казахский агротехнический исследовательский университет

имени С. Сейфуллина, Республика Казахстан, г. Астана

²Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова,

Республика Казахстан, г. Караганда,

⁴ТОО «KAZ MINERALS» Актогай, Республика Казахстан, п. Актогай.

Поступило в редакцию 22.10.24

Поступило с исправлениями 26.11.24

Принято в печать 04.12.24

РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ НАБЛЮДАТЕЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ

В статье рассмотрена система косвенной защиты электромеханического преобразователя асинхронного генератора с короткозамкнутым ротором от превышения температуры. С целью построения косвенной системы защиты от перегрева статорных обмоток разработан наблюдатель температуры и алгоритм его работы. Для исследования разработанного алгоритма наблюдателя температуры была создана имитационная модель электромеханического преобразователя асинхронного генератора с короткозамкнутым ротором. Имитационные исследования выполнены в пакетах прикладных программ MATLAB/SIMULINK и SimPowerSystems. В результате, выполнен анализ зависимостей ошибки модели наблюдателя сопротивления обмотки статора для электромеханического преобразователя асинхронного генератора с короткозамкнутым ротором от превышения температуры в диапазоне мощностей 3 кВт ÷ 200 кВт. С целью повышения точности вычисления температуры наблюдателя введен поправочный коэффициент и определена его зависимость в функции мощности асинхронного генератора. Ошибка косвенного вычисления температуры электромеханического преобразователя асинхронного генератора с учетом поправочного коэффициента не превышает 1%. Предлагаемый наблюдатель температуры может быть применен для построения защит электромеханического преобразователя асинхронного типа с короткозамкнутым ротором. Предложен принцип построения наблюдателя температуры для

защиты электромеханического преобразователя асинхронного типа с короткозамкнутым ротором от перегрева.

Ключевые слова: электромеханический преобразователь, имитационная модель, тепловая защита, генератор, статор, температура.

*G. S. Nurmaganbetova¹, V. V. Kaverin², S. S. Issenov³,

U. K. Iskakov⁴, E. K. Sarsembieva⁵

^{1,3,5}Kazakh Agrotechnical Research University named after S. Seifullin,
Republic of Kazakhstan, Astana

²Abylkas Saginov Karaganda Technical University,
Republic of Kazakhstan, Karaganda,

⁴LLP «KAZ MINERALS» Aktogay, Republic of Kazakhstan, Aktogay village
Received 22.10.24

Received in revised form 26.11.24

Accepted for publication 04.12.24

DEVELOPMENT OF A SIMULATION MODEL OF ASYNCHRONOUS GENERATOR TEMPERATURE OBSERVER WITH A SHORT-CIRCUITED ROTOR

The article considers a system of indirect protection of an electromechanical converter of an asynchronous generator with a short-circuited rotor from temperature excess. In order to build an indirect system of protection against overheating of the stator windings, a temperature observer and an algorithm for its operation have been developed. To study the developed temperature observer algorithm, a simulation model of an electromechanical converter of an asynchronous generator with a short-circuited rotor was created. Simulation studies were performed in MATLAB/SIMULINK and SimPowerSystems application software packages. As a result, the analysis of the dependences of the error of the stator winding resistance observer model for an electromechanical converter of an asynchronous generator with a short-circuited rotor on temperature exceeding in the power range of 3 kW to 200 kW is performed. In order to increase the accuracy of calculating the observer's temperature, a correction factor was introduced and its dependence on the power function of an asynchronous generator was determined. The error of indirect calculation of the temperature of the electromechanical converter of an asynchronous generator, taking into account the correction factor,

does not exceed 1 %. The proposed temperature observer can be used to build protections for an asynchronous type electromechanical converter with a short-circuited rotor. The principle of constructing a temperature observer to protect an electromechanical asynchronous converter with a short-circuited rotor from overheating is proposed.

Keywords: electromechanical converter; simulation model, thermal protection, generator; stator; temperature.

Теруге 04.12.2024 ж. жіберілді. Басуға 30.12.2024 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 №4317

Сдано в набор 04.12.2024 г. Подписано в печать 30.12.2024 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 № 4317

«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