

Асинхронды генератордың статор орамасының белсенді кедергісі мен температурасын жанама түрде анықтау

¹**НҰРМАҒАНБЕТОВА Гүлім Сахитовна**, PhD, аға оқытушы, g_sahitovna@mail.ru,

²**КАВЕРИН Владимир Викторович**, т.ф.к., профессордың м.а., kaverinkz@inbox.ru,

³**СТАЖКОВ Сергей Михайлович**, т.ф.д., профессор, stazhkov@mail.ru,

²**ЭМ Геннадий Аркадиевич**, магистр, аға оқытушы, egaapp@mail.ru,

^{2*}**НҰРМАҒАМБЕТОВА Гүльмира Сахитовна**, магистр, аға оқытушы, gulmira_gulmirka@mail.ru,

¹«С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті» КеАҚ, Жеңіс даңғылы, 62, Астана, Қазақстан,

²«Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті» КеАҚ, Н. Назарбаев даңғылы, 56, Қарағанды, Қазақстан,

³Д.Ф. Устинов атындағы «ВОЕНМЕХ» Балтық мемлекеттік техникалық университеті, 1-ші Красноармейская көшесі, 1, Санкт-Петербург, Ресей,

*автор-корреспондент.

Аңдатпа. Мақалада қысқа тұйықталған роторлы асинхронды генераторлардың статор орамаларының қоректену тізбегіне импульстік компонентті енгізе отырып, асинхронды генераторлардың температурасын есептеудің жанама әдістері қарастырылған. Бұл мәселенің өзектілігі олардың сенімділігі мен қауіпсіздігін арттыру үшін асинхронды энергия түрлендіргіштерін жетілдіру қажеттілігімен анықталады. Қысқа тұйықталған роторлы асинхронды генератордың статор орамасының кедергісін өлшеу арқылы температураны анықтаудың жанама әдісі ұсынылған. Әдіс 50 Гц айнымалы желілік синусоидалы кернеуге төмен амплитудалы импульстік сигнал мен жоғары жиілікті 600 Гц қабаттасуға негізделген. Модельдеу нәтижелері келтірілген. Зерттеу нәтижелері температураны жанама түрде анықтау және бағалау әдістерін қолдануға негізделген асинхронды энергия түрлендіргіштерінің жылудан қорғау жүйесін құру мүмкіндігін растайды.

Кілт сөздер: асинхронды генератор, қызып кетуден қорғау, имитационды модель, статор кедергісі, тұрақты тоқ компоненттері.

Кіріспе

Альтернативті энергетиканың бір бағыты – жел энергиясын электр энергиясына түрлендіру (жел генераторлары). Жел генераторлары өнеркәсіптік жиіліктегі электр желісімен бірге жұмыс істегенде, әдетте, асинхронды энергия түрлендіргіштері (АЭТ) қолданылады.

Асинхронды генераторлар (АГ), жел энергиясын электр энергиясына түрлендіру ретінде жұмыс істей отырып, сыртқы ауытқуларға ұшырайды, көбінесе стохастикалық сипатта болады, нәтижесінде АГ біліктеріндегі жүктеме номиналды мәндерден әлдеқайда жоғары болуы мүмкін, сонымен қатар периодты сипатта болады.

Сондықтан жел электр станцияларының асинхронды генераторлары әдетте жылу

қорғанысымен жабдықталған, онда негізгі бақыланатын параметрлер статор орамаларының температурасы мен тогы болып табылады.

Жел электр станцияларының асинхронды генераторлары үшін жылу қорғауды техникалық іске асырудың бір проблемасы статор орамаларының температурасын ағымдағы бақылау болып табылады. Статор орамаларының тогы бойынша қорғауды іске асыру жел электр станцияларының жоғарғы бөлігінде конструктивті орналасқан асинхронды генератордың ауамен салқындату қарқындылығын есепке алуды қамтамасыз етпейді.

Демек, жел электр станцияларының асинхронды генераторларын жанама жылудан қорғау әдістерін әзірлеуге арналған зерттеулер, жылу шығару және жылу тарату

процестерін ескере отырып, ғылыми жаңалыққа ие болады.

Дәстүрлі емес жаңартылатын электр энергетикасының басым бағыттарының бірі жел генераторлары болып табылады. 2025 жылға қарай Қазақстан Республикасында жалпы қуаты 700 МВт-тан асатын жел электр станцияларын іске қосу көзделіп отыр.

Қазіргі уақытта жел генераторларында электромеханикалық түрлендіргіштер ретінде тұрақты ток генераторлары, асинхронды генераторлар, синхронды генераторлар, асинхронды синхронды генераторлар [1-3] кеңінен қолданылады.

Генератордың әр түрінің өзіндік артықшылықтары мен кемшіліктері бар. Қысқа тұйықталған роторлы асинхронды генератор 1 МВт-тан асатын жел энергетикасында ең көп таралған түрі [4]. Жел генераторларының осы класы үшін желдің шекті жылдамдығы 26 м/с құрайды.

Xian huaao Electronic Technology Co Ltd (Қытай) компаниясының маманы Сиань Хуаао электр қозғалтқышының статор температурасының функциясында биметалл пластинасының геометриясын өзгерту әсерін пайдалануға негізделген қозғалтқышты қызып кетуден қорғау құрылғысын ұсынды [5]. Ұсынылған құрылғы қоршаған ортаның температурасын және мәжбүрлі салқындату қарқындылығын ескермейтінін атап өткен жөн.

Mortimer W Fish басшылығымен мамандар тобы электр қозғалтқыш орамаларының қызып кетуінен қорғаудың техникалық құрылғысын ұсынды [6]. Ұсынылған құрылғы температураға сезімтал кедергіні қамтамасыз етуді пайдалануға негізделген. Термосезімтал элемент кедергінің теріс температуралық коэффициентіне ие болуы керек.

Бұл құрылғының кемшіліктері электр қозғалтқышының конструкциясын өзгерту қажеттілігін қамтиды, бұл электр қозғалтқышының құрылымдық элементтерімен температураға сезімтал кедергінің жылу алмасуын қамтамасыз етеді.

Бұл жұмыста қысқа тұйықталған роторы бар АҚ статорының кедергісін өлшеу негізінде температураны анықтаудың жанама әдісі ұсынылған.

Материалдар мен әдістер

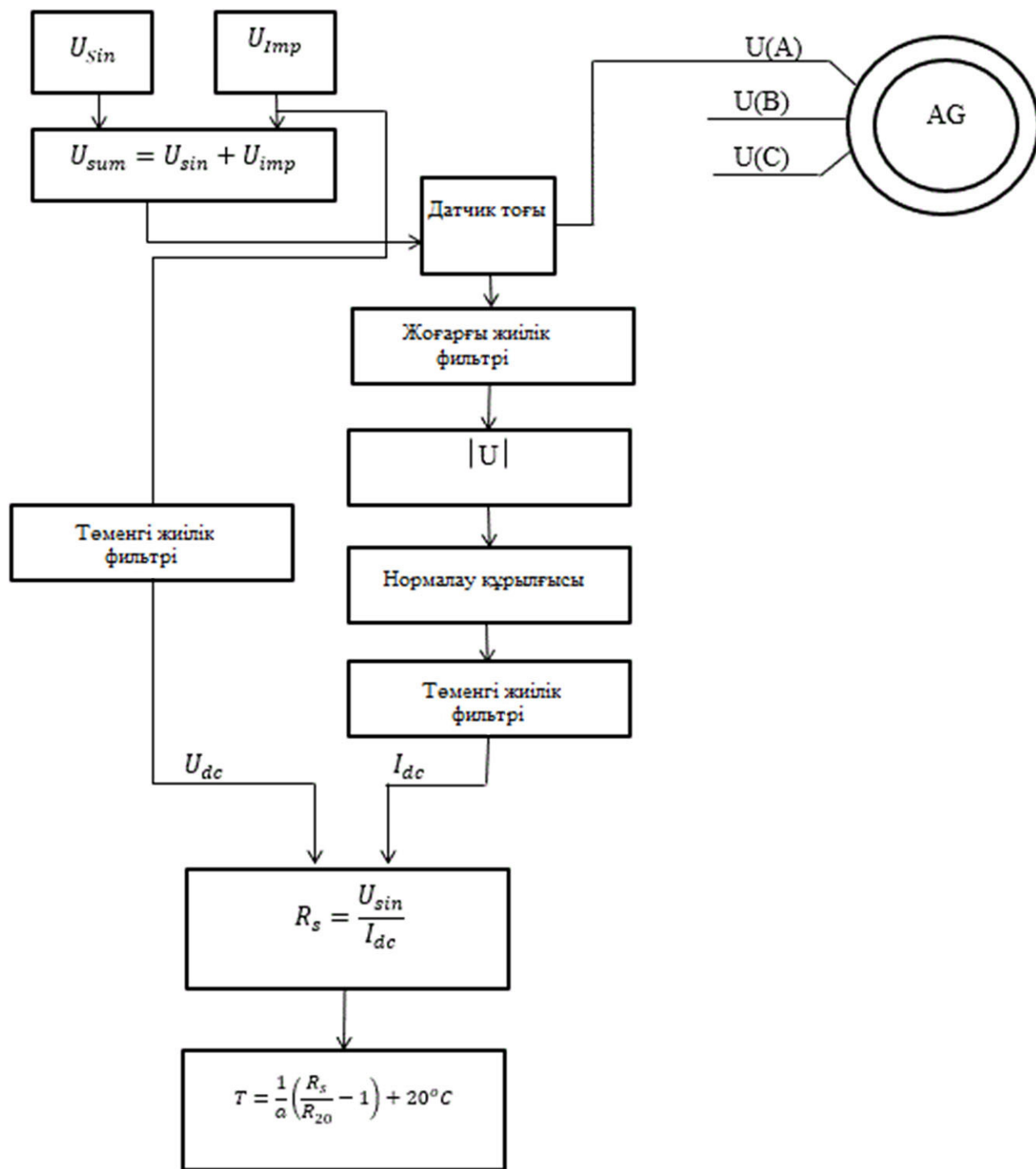
ҚТР мен АГ жұмысының әртүрлі режимдерін талдау мәселелерінде классикалық электромеханикалық модельдер α - β стационарлық координаттар жүйесіндегі күй кеңістігінде кең таралды, мұнда статордың ток векторы және ротордың ағындық векторы [7, 8] күй айнымалысы ретінде қабылданды, ол келесі түрде сипатталады:

$$\begin{cases} U_{sa} = \left(L_S + \frac{L_m^2}{L_R} \right) \left(\frac{1}{T_S} i_{sa} + \frac{di_{sa}}{dt} \right) - \\ - \frac{L_m}{L_R T_R} \psi_{ra} - p\omega \frac{L_m}{L_R} \psi_{r\beta}; \\ U_{s\beta} = \left(L_S + \frac{L_m^2}{L_R} \right) \left(\frac{1}{T_S} i_{s\beta} + \frac{di_{s\beta}}{dt} \right) - \\ - \frac{L_m}{L_R T_R} \psi_{r\beta} + p\omega \frac{L_m}{L_R} \psi_{ra}; \\ 0 = -\frac{L_m}{T_R} i_{sa} + \frac{1}{T_R} \psi_{ra} + \frac{d\psi_{ra}}{dt} + p\omega \psi_{r\beta}; \\ 0 = -\frac{L_m}{T_R} i_{s\beta} + \frac{1}{T_R} \psi_{r\beta} + \frac{d\psi_{r\beta}}{dt} - p\omega \psi_{ra}; \\ J \frac{d\omega}{dt} = p \frac{L_m}{L_R} (\psi_{ra} i_{s\beta} - \psi_{r\beta} i_{sa}) - M_L, \end{cases} \quad (1)$$

мұндағы U_{sa} , $U_{s\beta}$ статор кернеуінің нақты және күрделі бөлігінің векторларының құрамдас бөліктері, i_{sa} , $i_{s\beta}$ және ψ_{ra} , $\psi_{r\beta}$ сәйкесінше статор тогы мен ротор ағынының векторларының құрамдас бөліктері; ω – бұрыштық жылдамдық, рад/с; M_L – білікке жүктеме моменті, Н·м; J – ротордың инерция моменті, кг·м², p – полюс жұптарының саны; R_S , R_R – статор мен ротордың белсенді кедергісі, Ом; L_R , L_S – ротор мен статордың индуктивтілігі, Гц; L_m – өзара индуктивтілік, Гц; T_S , T_R – статор және ротор орамаларының уақыт тұрақтылары.

Бұл теңдеулер жүйесі (1) ҚТР бар АГ имитационды моделін әзірлеуге негіз болып табылады, сонымен қатар статор орамасының қоректену кернеуіне импульстік сигналдарды қолдану әдісінің алгоритмі жасалды (1-сурет), бұл статор орамасының белсенді кедергісі мен температурасын анықтауға мүмкіндік береді. Ұсынылып отырған әдіс [9] көрсетілген әдіспен салыстырғанда айтарлықтай аз энергия шығындарын қажет етеді.

Қолданылған әдіс келесідей жүзеге асырылды. ҚТР бар асинхронды генератордың $U(A)$ фазасына сигнал беріледі, ол жоғары жиілікті 600 Гц кіші амплитудасы мен өнеркәсіптік жиіліктегі асинхронды машинаның электрмен жабдықтау кернеуінің импульстік сынақ сигналының (U_{imp}) қосындысы болып табылады. Ток датчигы фазалық токты өлшейді. Электр қозғалтқыштарының статор орамасының өлшенген тогының құрамында U_{imp} компоненті бар. Бірінші гармоника U_{imp} селективті сүзгі арқылы ерекшеленеді. Бұл жағдайда өнеркәсіптік жиілік сигналын басу жүзеге асырылады. Келесі қадам – U_{imp} сигналының тұрақты компоненті және амплитудасы бойынша масштабтау. Токтың тұрақты компоненті электр қозғалтқышының жүктемесін анықтайды. Ток пен кернеудің өлшенген мәндеріне сүйене отырып, статор орамасының белсенді кедергісі есептеледі. Әдетте, асинхронды машиналардың статор



1-сурет – Фазалық кернеулер бойынша импульстік компоненттерді қабаттастыру әдісінің жұмыс алгоритмі

орамалары мыс сыммен жасалады. Температура шамасы статор орамдарының кедергісіне пропорционалды тәуелділікке ие болады.

Теориялық зерттеулер барысында 4А сериялы генераторлық режимде қысқа тұйықталған роторлы асинхронды машина үшін статор орамаларының температурасын жанама анықтау әдісінің сипаттамалары анықталды.

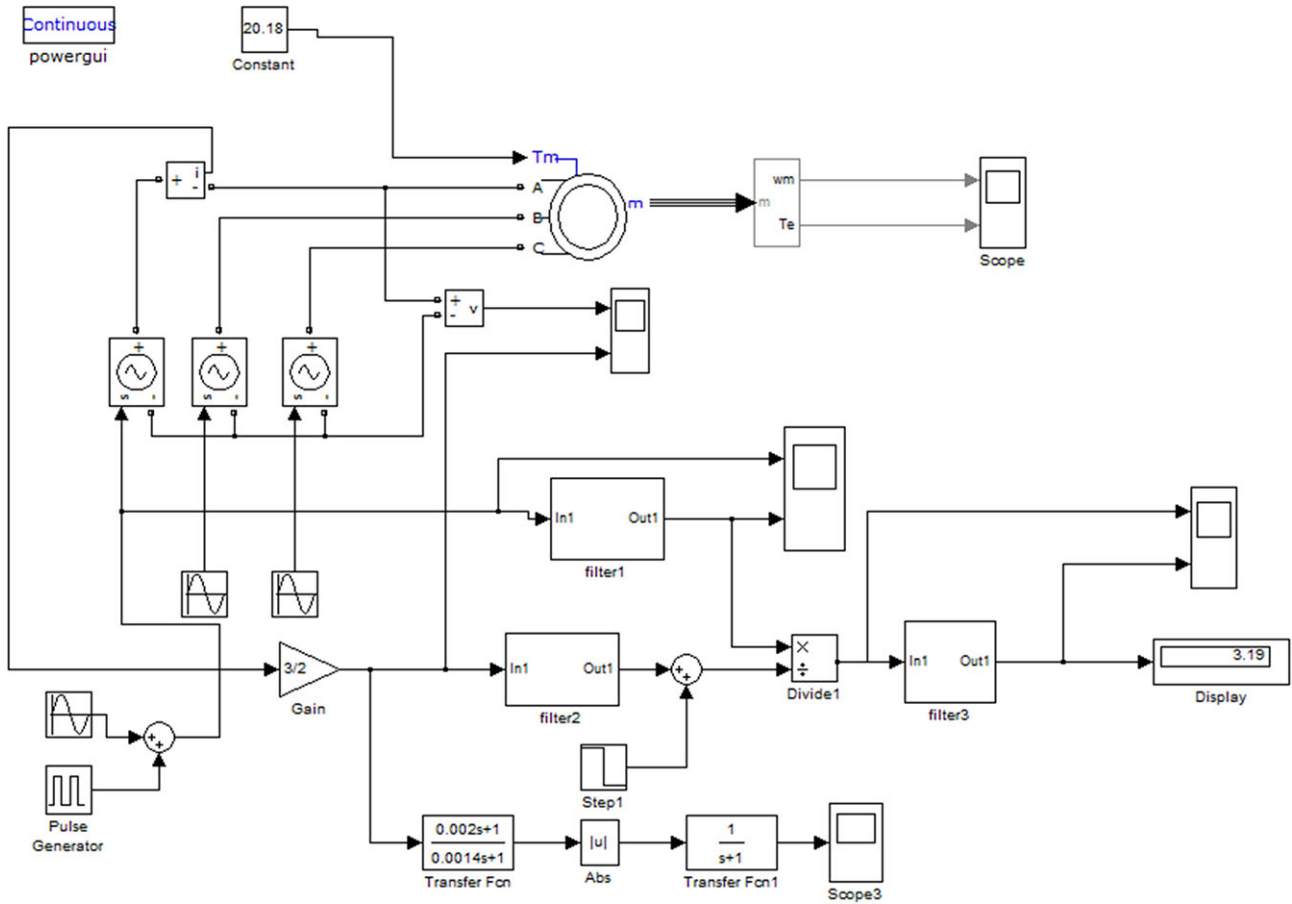
Асинхронды машинаның таңдалған түрі үшін MatLab қолданбалы бағдарламалар пакетіндегі статор орамдарының температурасын жанама өлшеу датчигының имитациялық моделі жасалды [10]. 2-суретте қысқа тұйықталған роторы бар жанама асинхронды машина датчигының имитациялық моделі көрсетілген.

$U(A)$ фазасына жоғары жиілікті, кіші амплитуды

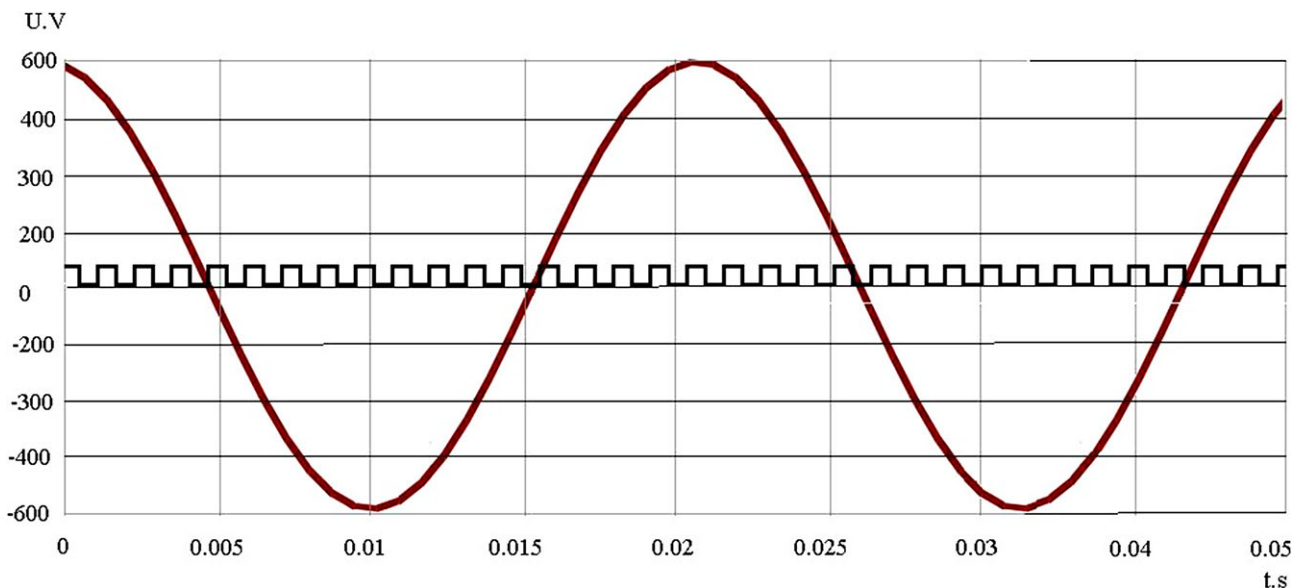
литудалы импульстік сигналдың және үлкен амплитудасы бар 50 Гц статорды электрмен жабдықтаудың синусоидалы сигналының

қосындысы беріледі (3-сурет). Бұл фазада фазалық ток өлшенеді.

Жоғары жиілікті модуляцияланған сиг-



2-сурет – Асинхронды машинаның статор орамдарының жанама температурасын өлшеуге арналған датчиктің имитационды моделі



3-сурет – Импульстік сигналды синусоидалы кернеуге қабаттастыру

налдың графигі 4-суретте келтірілген.

Өлшенген токтардың құрамында жоғары және төмен жиілікті сүзгілермен ерекшеленетін импульстік компоненттер бар. 600 Гц жоғары жиілікті импульстарды жоғары жиілікті сүзгі шығарады, содан кейін сигналдар 5-суретте көрсетілген электр қозғалтқышының жүктемесін анықтайтын тұрақты ток компонентін шығару үшін төменгі жиілікті сүзгіге беріледі.

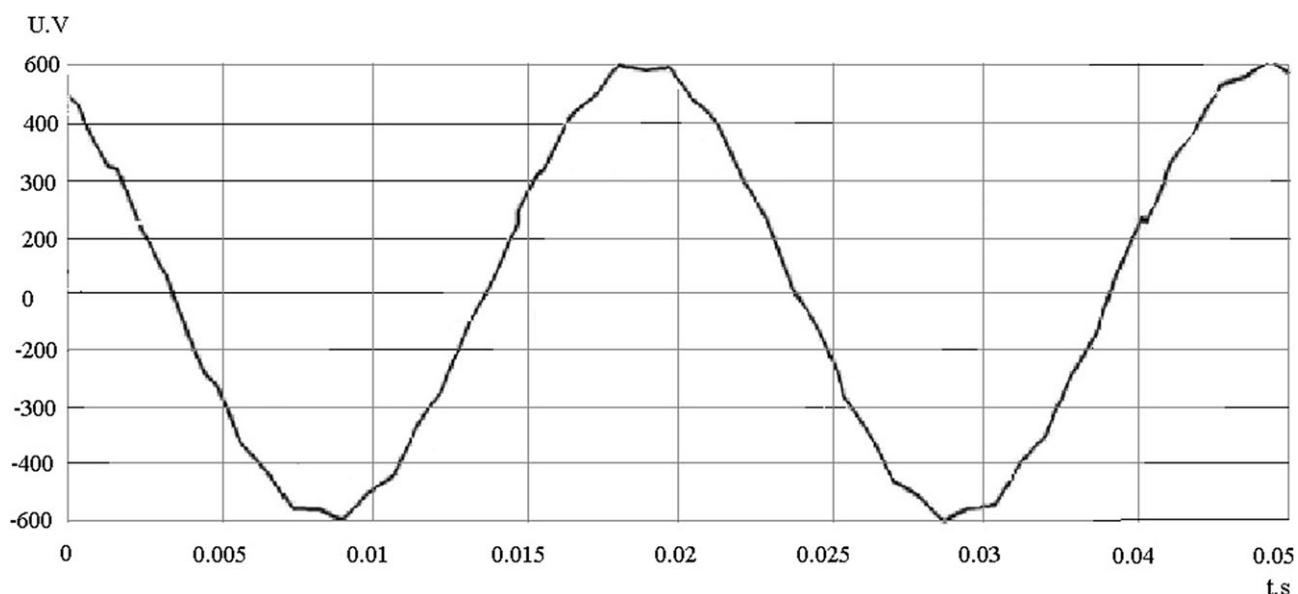
Қорытынды

1. Имитациялық зерттеулер жүргізу үшін Simulink бағдарламалық ортасында MatLab қолданбалы бағдарламалар пакетін қолдана отырып, оның кедергісін өлшеу арқылы статор орамасының температурасын анықтаудың жанама әдісі негізінде генератордың

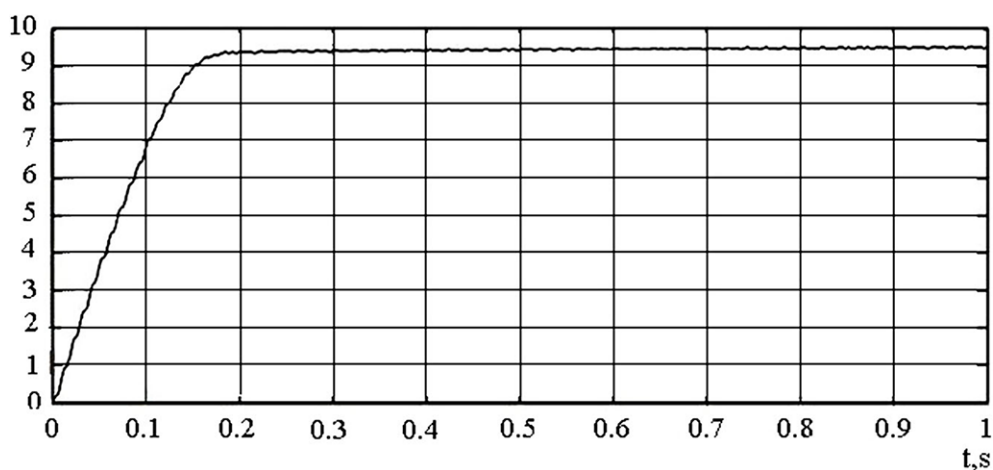
жылу қорғау датчигінің имитациялық моделі әзірленді. Негіз ретінде қозғалмайтын координаттар жүйесінде қысқа тұйықталған роторы бар асинхронды генератордың математикалық моделі қолданылды.

2. Генератордың статор орамасының температурасын оның кедергісін өлшеу арқылы анықтау әдісінің алгоритмі жасалды. Бұл алгоритм генератордың фазалық кернеуіне төмен амплитудасы бар жоғары жиілікті қосымша импульстік сигналды қолдануға негізделген және статор тогын бөліп, статор кедергісін анықтауға арналған.

3. Статор орамасының температурасын оның кедергісін өлшеу арқылы жанама әдісі негізінде генератордың жылу қорғау датчигін анықтаудың имитациялық моделімен имитациялық эксперименттер жүргізілді.



4-сурет – Модуляцияланған жоғары жиілікті сигнал



5-сурет – Idc фазалық токтың тұрақты компонентін ерекшелеу

Ғылыми жұмысты Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитеті қаржыландырды, ЖТН № АР19677354 «Жел электр станциялары-

ның асинхронды генераторларын жанама жылудан қорғау жүйелерін әзірлеу» жобасы шеңберінде орындалды.

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Lebsir A., Bentounsi A., Benbouzid M.E.H., Mange H. Electric Generators Fitted to Wind Turbine Systems: An Up-to-Date Comparative Study // Journal of Electrical Systems. 11(3), 2015. Pp. 281-295.
2. Mohanrajan S.R. A Study of Motor – Generator Topologies for Pumped Storage Applications // Conf. on Advances In Engineering And Technology. – ICAET, 2014. Pp. 627-335. doi:10.15224/ 978-1-63248-028-6-02-132.
3. Wenping C., Ying X., Zheng T. Wind Turbine Generator Technologies: book. Advances in Wind Power, 2012. doi: 10.5772/51780.
4. Thermal Fatigue Model for Wind Turbine Generator Life Prediction: Physics-based Model for Real Time Health Monitoring. EPRI, 2022. <https://www.epri.com/research/products/000000003002023790>
5. Xi'an Huaao. Patents CN102487191A. Motor overheating protection relay. Priority to 2010-12-06. Publication 06.06.2012.
6. Mortimer W. Fish, Donald F. Alexander. Patents US2463935A. Thermal motor protector. Priority to 1945-07-09. Publication 03.08.1949.
7. Копылов И.П. Проектирование электрических машин: учебник для вузов. М.: Изд-во «Юрайт», 2019. 828 с.
8. Брейдо И.В., Нурмаганбетова Г.С. Метод косвенного измерения температуры нагрева статорных обмоток асинхронного электродвигателя // Вестник АУЭС. Вып. № 4 (7) 43, 2018. С. 19-21.
9. Nurmaganbetova G., Issenov S., Kaverin V., Issenov Z. Development of a virtual hardware temperature observer for frequencycontrolled asynchronous electric motors // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, Vol. 3, 1 (123), 2023. pp. 68-75. DOI: 10.15587/1729-4061.2023.280357.
10. Герман-Галкин С.Г. Виртуальные лаборатории полупроводниковых систем в среде MATLAB-SIMULINK: учебник. М.: Изд-во «Лань», 2021. 448 с.

Косвенное определение активного сопротивления и температуры обмотки статора асинхронного генератора

¹**НҰРМАҒАНБЕТОВА Гүлім Сахитовна**, PhD, старший преподаватель, g_sahitovna@mail.ru,

²**КАВЕРИН Владимир Викторович**, к.т.н., и.о. профессора, kaverinkz@inbox.ru,

³**СТАЖКОВ Сергей Михайлович**, д.т.н., профессор, stazhkov@mail.ru,

²**ЭМ Геннадий Аркадиевич**, магистр, старший преподаватель, egaapp@mail.ru,

^{2*}**НҰРМАҒАМБЕТОВА Гульмира Сахитовна**, магистр, старший преподаватель, gulmira_gulmirka@mail.ru,

¹НАО «Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина», пр. Женис, 62, Астана, Казахстан,

²НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова», пр. Н. Назарбаева, 56, Караганда, Казахстан,

³Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ»

имени Д.Ф. Устинова, ул. 1-я Красноармейская, 1, Санкт-Петербург, Россия,

*автор-корреспондент.

Аннотация. Рассматриваются косвенные методы вычисления температуры асинхронных генераторов с введением импульсной составляющей в цепи питания статорных обмо-

ток асинхронных генераторов с короткозамкнутым ротором. Актуальность этого вопроса определяется необходимостью совершенствования асинхронных преобразователей энергии для повышения их надежности и безопасности. Предложен косвенный метод определения температуры на основе измерения сопротивления статора асинхронного генератора с короткозамкнутым ротором. Метод основан на наложении импульсных сигналов небольшой амплитуды и высокой частоты 600 Гц на переменное сетевое синусоидальное напряжение частотой 50 Гц. Даны результаты моделирования. Результаты исследований подтверждают возможность косвенного определения температуры и создания системы тепловой защиты для асинхронных преобразователей энергии на основе использования методов оценивания.

Ключевые слова: асинхронный генератор, защита от перегрева, имитационная модель, активное сопротивление статора, температурная защита.

Indirect Determination of the Active Resistance and Temperature of the Stator Winding of an Asynchronous Generator

¹**NURMAGANBETOVA Gulim**, PhD, Senior Lecturer, g_sahitovna@mail.ru,

²**KAVERIN Vladimir**, Cand. of Tech. Sci., Acting Professor, kaverinkz@inbox.ru,

³**STAZHKOV Sergey**, Dr. of Tech. Sci., Professor, stazhkov@mail.ru,

²**EM Gennady**, Master's Degree, Senior Lecturer, egaapp@mail.ru,

^{2*}**NURMAGAMBETOVA Gulmira**, Master's Degree, Senior Lecturer, gulmira_gulmirka@mail.ru,

¹NCJSC «S. Seifullin Kazakh Agro Technical Research University», Zhenis Avenue, 62, Astana, Kazakhstan,

²NPJSC «Abylkas Saginov Karaganda Technical University», N. Nazarbayev Avenue, 56, Karaganda, Kazakhstan,

³D.F. Ustinov Baltic State Technical University «VOENMEKH», 1st Krasnoarmeyskaya Street, 1, Saint Petersburg, Russia,

*corresponding author.

Abstract. The indirect methods for calculating the temperature of asynchronous generators with the introduction of a pulse component in the power supply circuit of the stator windings of asynchronous generators with squirrel-cage rotor are considered. The relevance of this issue is determined by the need to improve asynchronous energy converters to increase their reliability and safety. An indirect method for determining temperature based on measuring the resistance of the stator of an asynchronous generator with squirrel-cage rotor is proposed. The method is based on superimposing pulse signals of small amplitude and high frequency of 600 Hz on an alternating mains sinusoidal voltage with a frequency of 50 Hz. There were given the simulation results. The research results confirm the possibility of indirect temperature determination and the creation of a thermal protection system for asynchronous energy converters based on the use of estimation methods.

Keywords: asynchronous generator, overheating protection, simulation model, active resistance of the stator, temperature protection.

REFERENCES

1. Lebsir A., Bentounsi A., Benbouzid M.E.H., Mange H. Electric Generators Fitted to Wind Turbine Systems: An Up-to-Date Comparative Study // Journal of Electrical Systems. 11(3), 2015. Pp. 281-295.
2. Mohanrajan S.R. A Study of Motor – Generator Topologies for Pumped Storage Applications // Conf. on Advances In Engineering And Technology. – ICAET, 2014. Pp. 627-335. doi:10.15224/ 978-1-63248-028-6-02-132.
3. Wenping C., Ying X., Zheng T. Wind Turbine Generator Technologies: book. Advances in Wind Power. 2012. doi: 10.5772/51780.
4. Thermal Fatigue Model for Wind Turbine Generator Life Prediction: Physics-based Model for Real Time Health Monitoring. EPRI. 2022. <https://www.epri.com/research/products/000000003002023790>.
5. Xi'an Huaao. Patents CN102487191A. Motor overheating protection relay. Priority to 2010-12-06. Publication 06.06.2012.
6. Mortimer W. Fish, Donald F. Alexander. Patents US2463935A. Thermal motor protector. Priority to 1945-07-09. Publication 03.08.1949.
7. Kopylov I.P. Proektirovanie jelektricheskikh mashin: uchebnik dlja vuzov [Design of electric machines]. Moscow: Publ. «Jurajt», 2019. 828 p.
8. Brejdo I.V., Nurmaganbetova G.S. Metod kosvennogo izmerenija temperatury nagreva statornyh obmotok asinhronnogo jelektrodivigatelja [Method of indirect measurement of the heating temperature of the stator windings of an asynchronous electric motor]. Vestnik AUJeS [Bulletin of the AUeS]. Vol. No. 4 (7) 43, 2018. Pp. 19-21.
9. Nurmaganbetova G., Issenov S., Kaverin V., Issenov Z. Development of a virtual hardware temperature observer for frequencycontrolled asynchronous electric motors // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, Vol. 3, no. 1 (123), 2023. Pp. 68-75. DOI: 10.15587/1729-4061.2023.280357.
10. German-Galkin S.G. Virtual'nye laboratorii poluprovodnikovyh sistem v srede MATLAB-SIMULINK: uchebnik [Virtual laboratories of semiconductor systems in the MATLAB-SIMULINK environment]. Moscow: Publ. «Lan'», 2021. 448 p.