

IT-ТЕХНОЛОГИИ, ЭНЕРГЕТИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

DOI: <https://www.doi.org/10.53002/073>

DEVELOPMENT OF A DIAGNOSTIC SYSTEM FOR A SYNCHRONOUS GENERATOR FOR MICRO-HYDROPOWER PLANTS

^{1*}Dyuysenbek Zh.S., ²Kamarova S.N., ²Druzhinin V.M., ²Kot A.D.

¹Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after Gumarbek Daukeev, Almaty, Kazakhstan

²Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan

* Corresponding author email: zhaniko.adina@mail.ru

Author information:

Dyuysenbek Zh.S. – Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after Gumarbek Daukeev, Almaty, Kazakhstan. E-mail: zhaniko.adina@mail.ru

Kamarova S.N. – Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan. E-mail: s.kamarova@ttu.edu.kz

Druzhinin V.M. – Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan.

Kot A.D. – Karaganda Industrial University, Temirtau, Kazakhstan.

Abstract. The article examines the issues of analyzing the electromagnetic state of an electrical machine using mathematical modeling. For the digital model, the finite element method implemented in the Ansys Electronics Desktop software was applied. A geometric model of the synchronous generator was built, the winding was divided to simulate inter-turn short circuits, meshing into finite elements was performed, and the material properties, permanent magnet parameters, and boundary conditions were defined. As a result of the simulation, phase current graphs and harmonic spectra were obtained for assessing electromagnetic compatibility. It was established that external circuit currents and EMF cannot reliably detect short-circuit fault conditions, which confirms the necessity of developing new diagnostic methods.

Keywords: micro-hydropower plants, hydrogenerator, synchronous motor, electrical machine, electric drive.

МИКРОГЭС-КЕ АРНАЛҒАН СИНХРОНДЫ ГЕНЕРАТОРДЫ ДИАГНОСТИКАЛАУ КЕШЕҢІН ӨЗІРЛЕУ

^{1*}Дүйсенбек Ж.С., ²Камарова С.Н., ²Дружинин В.М., ²Кот А.Д.

¹Гүмарбек Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, Алматы, Қазақстан

²Қарағанды индустриялық университеті, Теміртау, Қазақстан

*Корреспондент автор e-mail: zhaniko.adina@mail.ru

Авторлар туралы ақпарат:

Дүйсенбек Ж.С. – Гүмарбек Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, Алматы, Қазақстан. E-mail: zhaniko.adina@mail.ru

Камарова С.Н. – Қарағанды индустриялық университеті, Теміртау, Қазақстан. E-mail: s.kamarova@ttu.edu.kz

Дружинин В.М. – Қарағанды индустриялық университеті, Теміртау, Қазақстан.

Кот А.Д. – Қарағанды индустриялық университеті, Теміртау, Қазақстан.

Аңдатпа. Мақалада электр машинасының электромагниттік күйін талдау мәселелері математикалық модельдеу арқылы қарастырылады. Цифрлық модель үшін Ansys Electronics Desktop бағдарламасында жүзеге асырылған соңғы элементтер әдісі қолданылды. Синхронды генератордың геометриялық моделі жасалып, орамдардың аралық қысқа тұйықталуын имитациялау үшін орамдар бөлінісі орындалды, соңғы элементтерге жіктелді, материалдардың қасиеттері, тұрақты магниттің параметрлері және шекаралық шарттар берілді. Модельдеу нәтижесінде электромагниттік үйлесімділікті бағалау үшін фазалық токтардың графиктері мен гармоникалық спектрлері алынды. Зерттеу барысында сыртқы тізбектің токтары мен ЭҚК-сі бойынша қысқа тұйықталудың

апаттық режимін сенімді анықтау мүмкін еместігі айқындалды. Бұл жаңа диагностикалық әдістемелерді әзірлеу қажеттігін растайды.

Түйін сөздер: микрогидроэлектр станциялар, гидрогенератор, синхронды қозғалтқыш, электр машинасы, электр жетегі.

РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСА ДИАГНОСТИКИ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА ДЛЯ МИКРОГЭС

¹Дуйсенбек Ж.С., ²Камарова С.Н., ²Дружинин В.М., ²Кот А.Д.

¹Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева, Алматы, Казахстан

²Карагандинский индустриальный университет, Темиртау, Казахстан

*Корреспондент автор e-mail: zhaniko.adina@mail.ru

Информация об авторах:

Дуйсенбек Ж.С. – Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева, Алматы, Казахстан. E-mail: zhaniko.adina@mail.ru

Камарова С.Н. – Карагандинский индустриальный университет, Темиртау, Казахстан. E-mail: s.kamarova@tttu.edu.kz

Дружинин В.М. – Карагандинский индустриальный университет, Темиртау, Казахстан.

Кот А.Д. – Карагандинский индустриальный университет, Темиртау, Казахстан.

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы анализа электромагнитного состояния электрической машины с использованием математического моделирования. Для цифровой модели применён метод конечных элементов, реализованный в программе Ansys Electronics Desktop. Построена геометрическая модель синхронного генератора, выполнено разделение витков для имитации межвиткового короткого замыкания, произведено разбиение на конечные элементы, заданы свойства материалов, параметры постоянного магнита и граничные условия. В результате моделирования получены графики фазных токов и спектры гармоник для оценки электромагнитной совместимости. Установлено, что по токам и ЭДС внешней цепи невозможно надёжно выявить аварийный режим короткого замыкания, что подтверждает необходимость разработки новых диагностических методик.

Ключевые слова: микрогидроэлектростанции, гидрогенератор, синхронный двигатель, электрическая машина, электропривод.

НЕГІЗГІ ЕРЕЖЕЛЕР

Ansys Electronics Desktop бағдарламалық ортасында ақырлы элементтер әдісін қолдана отырып, микро гидроэлектростанцияларға арналған синхронды генератордың математикалық моделі жасалды. Генератордың сандық моделі геометриялық параметрлерді, материалдардың қасиеттерін, тұрақты магниттердің сипаттамаларын және айналмалы қысқа тұйықталуды модельдеу мүмкіндігін ескере отырып жасалған.

Генератордың әртүрлі жұмыс режимдеріндегі электромагниттік процестерге талдау жасалды. Фазалық токтардың, ЭМӨ-нің, электромагниттік моменттің, ағынның, индуктивтіліктің және сигналдардың гармоникалық құрамының тәуелділігі электромагниттік үйлесімділікті және Машинаның құрылымдық ерекшеліктерінің оның жұмыс сипаттамаларына әсерін бағалауға мүмкіндік береді.

Тек сыртқы электр параметрлерін (фазалық Токтар мен ЭҚК) бақылау айналмалы қысқа

тұйықталудың сенімді анықталуын қамтамасыз етпейтіні анықталды. Электромагниттік параметрлерді кешенді талдауға негізделген мамандандырылған диагностикалық жүйені әзірлеу қажеттілігі негізделген, бұл микрогЭС синхронды генераторларының сенімділігін арттыруға және дамып келе жатқан ақауларды уақтылы анықтауға мүмкіндік береді.

КІРІСПЕ

Гидроэнергетиканың қазіргі жағдайы мен даму келешегін сөз еткенде, қуаты 1 МВт-қа дейінгі шағын және микро-гидроэлектр станцияларын (микроГЭС) құру мен пайдаланудың қарқынды дамып келе жатқан бағытын атап өтпеуге болмайды.

МикроГЭС-ке арналған материалдар ғылыми әдебиеттерде сирек кездеседі. Дегенмен, тарихи тұрғыдан алғанда, энергетиканың қалыптасу және даму кезеңінің басында ең алғашқы пайда болған гидроэлектр станциялары дәл осы микроГЭС болатын. XX ғасырдың 30–40 жылдары олар қолда бар материалдар мен

автомобиль және ауылшаруашылық техникасының бөлшектерін пайдаланып, жергілікті жерде қолдан жасалды [1]. Кейін ірі ГЭС-тердің даму дәуірі басталып, жұмыс істеп тұрған шағын және микроГЭС-тер біртіндеп өзектілігін жоғалтты.

Жасыл энергетиканың және таратылған генерацияның дамуына байланысты микроГЭС қайтадан өзекті бола бастады.

Олар тиісті гидроэнергетикалық әлеуеті бар децентрализованген электрмен жабдықтау аймақтары үшін автономды көздер ретінде электр энергиясын өндіре алады. Осы тұрғыдан алғанда микроГЭС-ке арналған гидроэнергетикалық жабдықты өнеркәсіптік тұрғыда әзірлеу мен өндіру қажеттілігі туындайды. Қазіргі уақытта бұл сала негізінен өнертабыстар, ұсақ сериялы және қолдан жасалған өндіріс деңгейінде қалып отыр.

Микрогидроэлектр станциялар — электр энергиясын өндіруге арналған шағын станциялар. Олардың жұмысында дәстүрлі түрде әртүрлі қуат пен құндағы синхронды гидрогенераторлар қолданылады. Мысалы, қуаты 10 кВт гидрогенератор электрмен қамту мәселесі бар шалғай аудандар үшін тиімді шешім болып табылады. Қуаты салыстырмалы түрде аз болғанына қарамастан, мұндай генератор әдетте тұрмыстық электр құралдарын қоректендіруге жеткілікті.

Судың жеткілікті напорын қамтамасыз ету қажеттілігіне байланысты, бұл саладағы эксперименттерде тұрақты ток қозғалтқыштары немесе асинхронды қозғалтқыштар сияқты электр жетектері пайдаланылады [1]. Микрогидроэлектр станциясына гидрогенераторды таңдау тұтынушылардың сипаттамаларына байланысты. Егер белсенді жүктемесі бар құрылғылар қолданылса, онда асинхронды генераторлар қолайлы. Алайда, егер желіде сорғылар немесе электрқозғалтқыштар сияқты реактивті жүктемесі бар құрылғылар болса, онда бұл міндетті тек синхронды генератор шеше алады [2].

Микро-гидроэлектр станцияларының сенімді және үздіксіз жұмыс істеуі синхронды генераторлардың техникалық күйін уақытылы бақылауға тікелей байланысты. Дегенмен, қазіргі ғылыми зерттеулерде синхронды генераторлардың жекелеген конструкциялық немесе пайдалану ерекшеліктері қарастырылғанымен, олардың электромагниттік күйін соңғы элементтер әдісі негізінде модельдеу арқылы диагностикалау және ақауларды ерте анықтау мәселелері жеткілікті деңгейде зерттелмеген. Әсіресе, орамаралық қысқа

тұйықталуларды сыртқы электрлік параметрлер бойынша анықтаудың шектеулері мен оларды анықтаудың тиімді тәсілдері толық негізделмеген. Сондықтан аталған зерттеу синхронды генераторлардың диагностикалық мүмкіндіктерін кеңейтуге, микроГЭС жабдықтарының сенімділігі мен пайдалану қауіпсіздігін арттыруға бағытталған.

Зерттеудің жаңалығы. Зерттеудің ғылыми жаңалығы микроГЭС-ке арналған синхронды генератордың цифрлық моделін Ansys Electronics Desktop бағдарламасында соңғы элементтер әдісі негізінде әзірлеп, оның электромагниттік күйіне кешенді талдау жүргізуінде. Модельде орамаралық қысқа тұйықталу режимдері имитацияланып, фазалық токтар, ЭҚК, электромагниттік момент, ағын байланысы, индуктивтік және гармоникалық құрам сияқты негізгі электромагниттік параметрлер зерттелді. Зерттеу нәтижесінде сыртқы тізбектегі токтар мен ЭҚК мәндерінің ғана орамаралық қысқа тұйықталуды сенімді анықтауға жеткіліксіз екендігі дәлелденіп, синхронды генераторлардың техникалық жай-күйін бағалауға арналған жаңа диагностикалық тәсілдерді әзірлеудің қажеттілігі ғылыми тұрғыдан негізделді.

ӘДІСТЕР МЕН МАТЕРИАЛДАР

Гидроэнергетиканың қазіргі жағдайы мен даму үрдістерін талдай отырып, ерекше назар аударуды қажет ететін бағыт – қуаты 1 МВт-қа дейінгі шағын және микро-гидроэлектр станцияларын пайдалану болып табылады.

Жаңартылатын энергетиканың дамуы жағдайында автономды және таратылған электрмен жабдықтаудың тиімді шешімдерін іздеуге баса көңіл бөлінуде. Осындай шешімдердің бірі – шағын және микро-гидроэлектр станцияларын пайдалану. Олар қарапайым құрылымымен, салыстырмалы түрде төмен капиталдық шығындарымен және орталықтандырылған желілерге шектеулі қолжетімділігі бар шалғай аудандарда қолдану мүмкіндігімен ерекшеленеді [3].

МикроГЭС-тің техникалық жүзеге асырылуын тексеру және пайдалану сипаттамаларын бағалау үшін зертханалық қондырғыларды қолдана отырып, тәжірибелік зерттеулер жүргізу қажет. Мұндай зерттеулер гидроагрегаттың жұмыс жағдайларын модельдеуге, сондай-ақ жабдықтың оңтайлы жұмыс режимдерін анықтауға мүмкіндік береді.

Осы зерттеу аясында негізгі агрегат ретінде қуаты 10 кВт Rewindagic HG-10000 гидрогенераторы пайдаланылды. Су ағынын имитациялау 11 кВт (1500 айн/мин, 5АИ типі,

өнімділігі 132 м³/сағ) асинхронды электрқозғалтқышына негізделген жиілікпен реттелетін электр жетегі арқылы жүзеге асырылды. Электрқондырғыны басқару Siemens құрылғыларының көмегімен орындалды. Гидрогенератордың параметрлері 1-кестеде келтірілген.

Кесте 1 – Гидрогенератордың параметрлері

Модель	HG-10000
Қуаты, Вт	10000
Номиналды кернеуі, В	220–400
Соңло диаметрі, мм	75
Су деңгейі, м	10–40
Ағын жылдамдығы, м³/с	0,4
Материалы	мыс металл

Егер тұрғын үйдің жанында немесе фермерлік шаруашылық аумағында өзен немесе жылға ағып жатса, онда судың ағысының энергиясын пайдалануға болады [4].

Плотиналардың тікелей жанында орналасқан қондырғылардан айырмашылығы, еркін ағынды гидроэлектр станциялар тек қана ағынды судың кинетикалық энергиясын пайдаланады. Мұндай қондырғылардың қуаты келесі формула бойынша анықталады [5]:

$$P = 0,5 \rho v^3 S \eta \quad (1)$$

мұндағы: P – жұмыс білігіндегі қуат (Вт); ρ – судың тығыздығы (1000 кг/м³); v – өзеннің ағыс жылдамдығы (м/с); S – гидромашинаның суға батырылған бөлігінің қимасының ауданы (м²); η – энергияны түрлендірудің пайдалы әсер коэффициенті.

Формулаға сәйкес, өзен ағысының жылдамдығы $v=1$ м/с болғанда, гидромашинаның белсенді бөлігінің 1 м²-ына ($\eta = 1$ кезінде) келетін қуат 500 Вт болады. Бұл фермерлік немесе саяжай шаруашылығының негізгі қажеттіліктерін қамтамасыз етуге жеткілікті [6].

Эквиваленттік сұлбалар әдісі электр машинасын біртекті денелердің жиынтығы ретінде қарастырады. Әр дененің шегінде параметрлер мен сипаттамалар тұрақты деп есептеледі, бірақ бір денеден екіншісіне өткенде өзгереді. Мысалы, якорь арқасындағы индукция бүкіл ұзындығы бойынша тұрақты деп саналады.

Бұл әдіс электр машиналарының магниттік тізбектерін есептеу үшін тиімді. Оның артықшылығы — жүзеге асырудың қарапайымдылығы. Алайда, магниттік және электрлік процестердің өзара әрекеттесуін ескеру қажет болатын күрделі есептерді шешкенде, мысалы, орамалық қысқа тұйықталулар кезінде, әдіс күрделене түседі.

Модельдеудің дәлдігін арттыру үшін біртекті емес денелердің санын көбейту қажет, бұл жүзеге

асыруды қиындатады. Әдістің кемшіліктеріне автоматтандырылған жобалау жүйелерінде математикалық модельдерді құруға арналған дайын процедуралардың болмауын жатқызуға болады, бұл өздігінен атқарылатын әрі көп еңбекті қажет ететін жұмысты талап етеді.

Практика көрсеткендей, цифрлық модельдерді құру үшін ең қолайлы әдіс — соңғы элементтер әдісі (FEM). Электр машинасының электромагниттік күйін есептегенде осы әдістің қолданылуын қарастырайық.

Соңғы элементтер әдісінің математикалық аппараты электромагниттік өрісті талдау үшін A векторлық магниттік потенциалына негізделген. Бұл абстрактылы шама магниттік индукция B физикалық сипаттамасымен келесі қатынас арқылы байланысады:

$$B = \text{rot} A = \nabla \cdot A \quad (2)$$

мұндағы: ∇ – лапласиан (∇^2) скалярлық функцияның екінші реттік туындыларының қосындысын көрсететін дифференциалдық оператор.

Магниттік индукция векторының құрамдас бөліктерін декарт координаталар жүйесінің остері бойынша талдай келе, біз келесі нәтижеге келеміз:

$$\begin{aligned} B_x &= (\nabla \cdot A)_x = \frac{\partial A_z}{\partial y} - \frac{\partial A_y}{\partial z} \\ B_y &= (\nabla \cdot A)_y = \frac{\partial A_x}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial x} \\ B_z &= (\nabla \cdot A)_z = \frac{\partial A_y}{\partial x} - \frac{\partial A_x}{\partial y} \end{aligned} \quad (3)$$

Магниттік индукция магнит өрісінің екінші іргелі сипаттамасы – кернеулік H шамасымен тығыз байланысты, ол Максвеллдің белгілі теңдеуімен сипатталады:

$$H = \frac{B}{\mu_0} - J \quad (4)$$

мұндағы: $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магниттік тұрақты; J – зерттеліп отырған нүкте үшін ортаның намагнитченность векторы.

$$H = \frac{B}{\mu_0 \mu} \quad (5)$$

мұндағы: μ – бұл ортаға тән салыстырмалы магнит өтімділікпен сипатталатын скалярлық шама.

Осылайша, магнит өрісін есептеу зерттелетін аймақтың әрбір нүктесіндегі векторлық магниттік потенциалдың мәнін анықтауға келіп тіреледі. Осыдан кейін өрістің барлық қалған параметрлерін белгілі қатынастарды пайдалану арқылы есептеп шығаруға болады.

Соңғы элементтер әдісі векторлық магниттік потенциалды дискретті модельдің көмегімен бөлік-сызықтық аппроксимациялауға

негізделген. Модель шектеулі сандағы аймақтарда анықталған, соңғы элементтер деп аталатын, бөлік-континуумдық функциялар жиынынан құралады.

Сандық модельді соңғы элементтер әдісін қолдану арқылы құру процесі айтарлықтай жеңілдетіледі, өйткені күрделі математикалық аппарат пен соңғы элементтерге жіктеу тәртібі қазіргі кезде формалданған және ANSYS, COMSOL, Elcut және басқа да автоматтандырылған жобалау жүйелерінде жақсы жолға қойылған [7].

Модельді құру үшін Ansys Electronics Desktop бағдарламалық кешенін пайдаланамыз. Бұл бағдарламалық құралды таңдаудың басты себебі – оның Гүмарбек Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университетінде ресми лицензиясының болуы.

НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ТАЛҚЫЛАУ

Берілген параметрлері мен өлшемдері анықталған нақты генераторды модельдеу үшін бірқатар есептеулер жүргізу қажет.

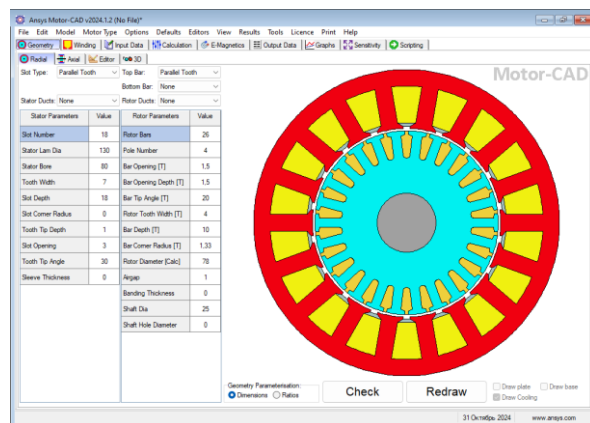
Магниттің биіктігі — 10 мм. Тұрақты магниттер самарий–кобальт қорытпасынан жасалған, олардың сипаттамалары: Br = 1,07 Тл, HсВ = 780 кА/м, ең жоғары жұмыс температурасы — 350 °С.

Ротор өзегінің материалы — болат-10. Статор өзегі үшін қалыңдығы 0,35 мм болат-2412 таңдалды. Якорь орамасы — екі қабатты, диаметрлік қадамды; полюс жұптарының саны — 8.

Есепті шешу төмендегі ретпен орындалады:

- синхронды генератордың геометриялық моделін құру;
- бірнеше орамды бөліп, орамалар арасындағы қысқа тұйықталуды имитациялау;
- есептеу аймағын соңғы элементтерге бөлу;
- материалдар мен тұрақты магниттің параметрлерін беру;
- шекаралық шарттарды қою;
- өрістік есебін шешу.

1-суретте синхронды генератордың екі өлшемді кеңістіктегі есептік моделі көрсетілген.

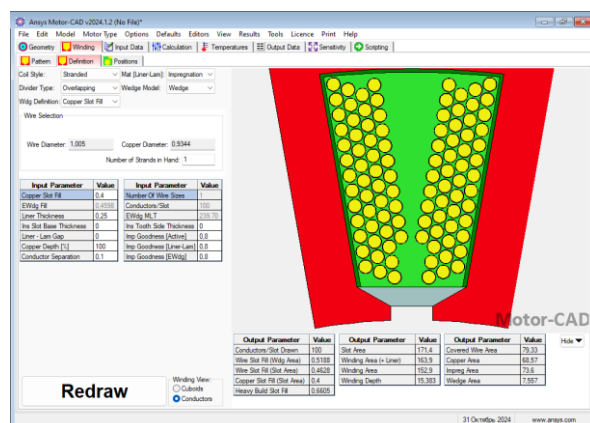


1-сурет. Синхронды генератордың есептік моделі

Электр машинасының осьтік симметриясы модельді едәуір жеңілдетуге және оның тек сегізден бір бөлігін ғана қарастыруға мүмкіндік берді, бұл есептеу уақытын айтарлықтай қысқартты. Шешілетін есептің түрі — Transient (қозғалмалы бөліктерін ескере отырып, магнит өрісінің тұрақсыз режимі) [8].

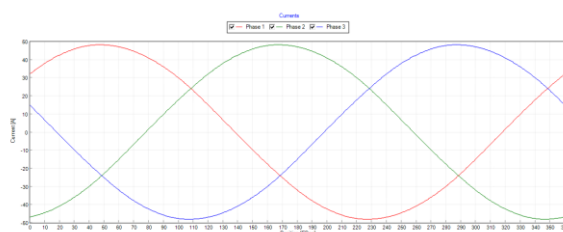
Әртүрлі қысқа тұйықталу жағдайларын талдау үшін орамды жеке витоктарға бөлеміз және өткізгіштің әрбір қимасы үшін терминал тағайындаймыз. Ораманың бүкіл сұлбасы да Citrix қосымшасында жеке витоктар түрінде көрсетіледі (қараңыз 2-сурет).

Сонымен қатар, қалақта пайда болатын механикалық момент оның нормальға қатысты көлбеу бұрышына тәуелді.

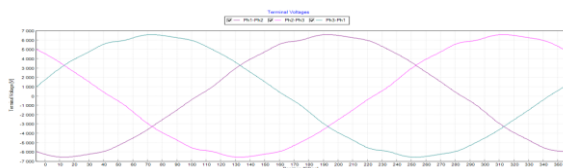


2-сурет. Статор орамаларының орналасу геометриясы

3 және 4-суреттерде апатсыз жұмыс режимі үшін якорь орамасының фазалық токтарының және ЭҚК фазаларының графиктерінің шығыс деректері көрсетілген.



3-сурет. Статор орамасы арқылы өтетін фазалық токтардың графигі

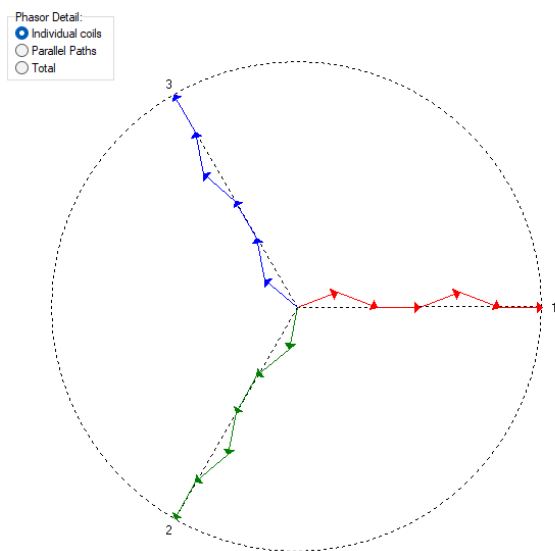


4-сурет. Апатсыз жұмыс режиміндегі якорь орамасының фазалық ЭҚК-і



5-сурет. Ротордың механикалық моменті

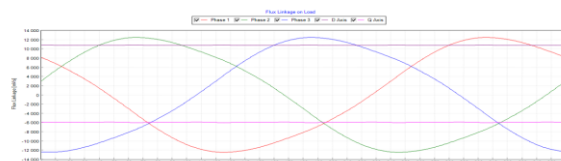
5-суретте электр машинасының электромагниттік моментінің ротордың бұрыштық қалпына тәуелділігі көрсетілген. Қызыл сызық машина математикалық моделінің теңдеулері негізінде алынған аналитикалық шешімді білдіреді. Екінші сызық – сандық модельдеу әдістерін пайдалана отырып есептелген момент. Моменттің шағын пульсациялары машинаның конструкциялық ерекшеліктерімен байланысты: мысалы, тісшелердің пішіні, гармоникалардың әсері және орамалардың асимметриясының болуы (7-суретте көрсетілген).



6-сурет. Фазорлар (phasors)

Фазорлар — электр тізбектерін тұрақты режимде зерттеу үшін электр техникасы мен электроэнергетикада қолданылатын, синусоидалық сигналдарды комплекс сандар түрінде математикалық сипаттау әдісі. Фазорлар графигінен көрініп тұрғандай, токтар симметриялы емес, бұл ротордың механикалық

моментіндегі пульсациялардың себебі болып табылады.



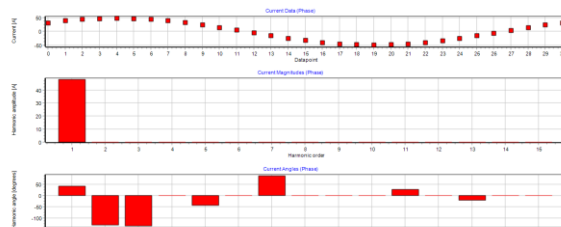
7-сурет. Жүктеме кезіндегі ағын байланысының (потокосцепление) графигі

Жүктеме кезіндегі ағын байланысының графигі (Flux Linkage on Load, 8-сурет) жүктеме тогы мен орамадағы магниттік ағын байланысының арасындағы корреляцияны көрсетеді. Жүктеме болған жағдайда ағын байланысы токтың артуы мен магниттік тізбектің қанығуына байланысты өзгереді. Осы деректерді пайдалана отырып электр машинасының жүктеме астындағы жұмысын талдау қанығумен байланысты бейсызықтықтарды анықтауға мүмкіндік береді. Қалыпты жағдайда бұл график түзу сызық түрінде болады, алайда токтың ұлғаюы кезінде аталған фактордың әсерінен стандартты пішіннен ауытқулар байқалуы мүмкін [9].



8-сурет. Индуктивтік графигі

8-суретте берілген графиктен электр машинасының индуктивтігі жүктеме кезінде тұрақты болып қалатыны көрінеді. Алайда бұл параметр магниттік қанығу дәрежесіне тәуелді, қанығу артқан жағдайда индуктивтік азаюы мүмкін.



9-сурет. Фазалық токтардың гармоникаларға тәуелділігі

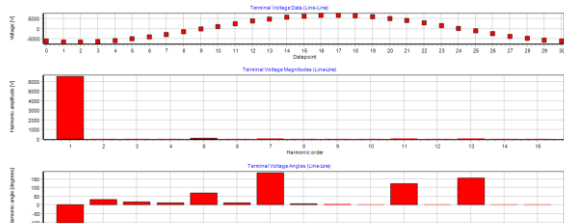
9-суретте электр машинасындағы фазалық токтар мен олардың сәйкес гармоникалары көрсетілген, олар фазалық токтардың уақытқа немесе гармоникалық құрамға байланысты таралуын бейнелейді. Бұл талдау машинаның жұмыс сапасын, оның электромагниттік

үйлесімділігін бағалау және гармоникалардан туындайтын бұрмалануларды анықтау үшін қажет.

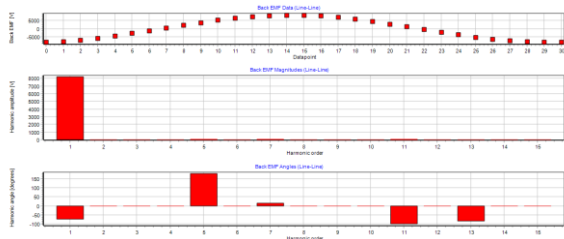
Негізгі гармоника желі жиілігіне немесе машинаның негізгі жұмыс жиілігіне сәйкес келеді. Жоғары реттік гармоникалар, мысалы бесінші және жетінші, магниттік тізбектің бейсызықтылығынан, орамалардың конструкциялық ерекшеліктерінен немесе қорек көзінен пайда болуы мүмкін. Бұрмаланулардың деңгейі THD (Total Harmonic Distortion) коэффициенті арқылы бағаланады.

Синхронды машина жағдайында идеалды ток синусоидалық пішінге ие болуы тиіс [10].

Графикті талдағанда сигнал формасының ерекшеліктеріне ерекше назар аудару қажет, оларды күтілетін номиналды мәндермен және гармоникалық құрам параметрлерімен салыстыру маңызды. Ұқсас деректер 10 және 11-суреттерде берілген сызықтық кернеулер мен қарсы ЭҚК графиктерінде де алынуы тиіс.



10-сурет. Сызықтық кернеулердің гармоникаларға тәуелділігі



11-сурет. Қарсы ЭҚК-тің гармоникаларға тәуелділігі

ҚОРЫТЫНДЫ

Генераторды модельдеу нәтижесінде сыртқы параметрлерді (ток пен ЭҚК) талдау қысқа тұйықталудың апаттық режимдерін дәл анықтай алмайтыны көрсетілді. Бұл өзге физикалық принциптерге негізделген диагностиканы қажет етеді. Фазалық токтар мен гармоникалардың графиктері алынып, олар электромагниттік үйлесімділікті бағалау және бұрмалануларды анықтау үшін маңызды. Зерттеулер жоғары гармоникалардың магниттік тізбектің бейсызықтылығынан, орамалардың конструкциялық ерекшеліктерінен немесе қорек көзінен туындайтынын растады. Соңғы

элементтер әдісі мен Ansys қолданылған модельдеу машинаның жұмыс динамикасын терең түсінуге мүмкіндік берді. Қорытынды: әзірленіп жатқан синхронды генератордың диагностикасы ықтимал апаттық жағдайларды тиімді бақылап, микроГЭС-тің тұрақты жұмысын қамтамасыз етеді.

Авторский вклад (таксономия CRediT):

Дүйсенбек Ж.С. – зерттеу тұжырымдамасын әзірлеу, әдіснаманы қалыптастыру, синхронды генератордың математикалық моделін әзірлеу, модельдеу жұмыстарын жүргізу, нәтижелерді талдау, мақаланың бастапқы нұсқасын дайындау. С.Н. Камарова – ғылыми жетекшілік, зерттеу әдіснамасын жетілдіру, модельдеу нәтижелерін тексеру, мақаланы ғылыми редакциялау. Дружинин В.М. – ғылыми әдебиеттерді талдау, Ansys Electronics Desktop бағдарламасында модельді әзірлеу, нәтижелерді түсіндіру, графикалық материалдарды дайындау, мақаланы рецензиялау. Кот А.Д. – есептеу нәтижелерін өңдеу және талдау, техникалық шешімдерді бағалау, зерттеу нәтижелерін талқылауға қатысу, мақаланы редакциялау. Барлық авторлар мақаланың соңғы нұсқасымен танысып, оны жариялауға мақұлдады және зерттеу нәтижесінің дұрыстығына ортақ жауапкершілік алады.

Финансирование. Исследование выполнено без привлечения внешнего финансирования.

Благодарности. Авторлар зерттеуді жүргізуге ғылыми және ұйымдастырушылық қолдау көрсеткені үшін Ғұмарбек Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университетіне және Қарағанды индустриялық университетіне алғыс білдіреді. Сонымен қатар, зерттеу барысында пайдаланылған Ansys Electronics Desktop бағдарламалық кешенін қолдануға мүмкіндік жасаған университет басшылығына және ғылыми кеңес берген әріптестеріне ризашылықтарын білдіреді.

Авторское право © 2026 принадлежит автору(ам). Данная статья распространяется на условиях открытого доступа в соответствии с лицензией Creative Commons Attribution–ShareAlike 4.0 International (**CC BY-SA 4.0**). Лицензия разрешает свободное использование, распространение и воспроизведение в любой форме при условии обязательного указания авторства и сохранения той же лицензии для производных материалов.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- 1 Лукутин, Б.В., Обухов, С.Г., Шандарова, Е.Б. Автономное электроснабжение от микрогидроэлектростанций // монография [Текст]. – Томск, 2017.
- 2 Gandzha S., Aminov D., Kiessh I. The development of an engineering technique for calculating magnet systems with permanent magnets. 2018 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 15–18 May 2018, Moscow, Russia. DOI: 10.1109/ICIEAM.2018.8728650.
- 3 Wegiel T., Borkowski D. Variable speed small hydropower plant // Proceedings – 2012 3rd IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems, PEDG 2012, 6253996. – P. 167–174.
- 4 Yu G., Cheng Y. Hydro Generator Stator Bar Modeling and Simulation Based on Finite Element Simulation // Coatings. – 2024. – Vol. 14, № 12. – Article 1499. – DOI: 10.3390/coatings14121499.
- 5 Korkosz M., Sztajmec E., Prokop J. Electromagnetic Performance Analysis of a Multichannel Permanent Magnet Synchronous Generator // Energies. – 2023. – Vol. 16, № 23. – Article 7816. – DOI: 10.3390/en16237816.
- 6 Yucai W. et al. Fault diagnosis of rotor winding inter-turn short circuit for sensorless synchronous generator rotor winding inter-turn short-circuit faults // IET Electric Power Applications. – 2017.
- 7 Ali W., Farooq H., Rasool A., Sajjad I.A., Cui Zhenhua, Ning L. Modeling and Analysis of the Dynamic Response of an Off-Grid Synchronous Generator Driven Micro Hydro Power System // International Journal of Renewable Energy Development. – 2021. – Vol. 10, № 2. – Pp. 373–384.
- 8 Inter-turn Short-Circuit Faults in Permanent Magnet Synchronous Machines: An Extended Review and Comprehensive Analysis / Zafarani M., Bostanci E., Qi Y., Goktas T., Akin B. // IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics. – 2018. – Vol. 6, № 4. – Pp. 2173–2195.
- 9 Fault detection of synchronous motor inter-turn short circuit based on second-harmonic features of dq-axis current. – 2025.
- 10 A Fault Feature Extraction Model in Synchronous Generator under Stator Inter-Turn Short Circuit Based on ACMD and DEO3S. – 2025.

REFERENCES

- [1] Lukutin B.V., Obukhov S.G., Shandarova E.B. Avtonomnoe elektrosnabzhenie ot mikrogidroelektrostantsiy // monografiya [Tekst]. – Tomsk, 2017.
- [2] Gandzha S., Aminov D., Kiessh I. The development of an engineering technique for calculating magnet systems with permanent magnets. 2018 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 15–18 May 2018, Moscow, Russia. DOI: 10.1109/ICIEAM.2018.8728650.
- [3] Wegiel T., Borkowski D. Variable speed small hydropower plant // Proceedings – 2012 3rd IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems, PEDG 2012, 6253996. – P. 167–174.
- [4] Yu G., Cheng Y. Hydro Generator Stator Bar Modeling and Simulation Based on Finite Element Simulation // Coatings. – 2024. – Vol. 14, no. 12. – Article 1499. – DOI: 10.3390/coatings14121499.
- [5] Korkosz M., Sztajmec E., Prokop J. Electromagnetic Performance Analysis of a Multichannel Permanent Magnet Synchronous Generator // Energies. – 2023. – Vol. 16, no. 23. – Article 7816. – DOI: 10.3390/en16237816.
- [6] Yucai W. et al. Fault diagnosis of rotor winding inter-turn short circuit for sensorless synchronous generator rotor winding inter-turn short-circuit faults // IET Electric Power Applications. – 2017.
- [7] Ali W., Farooq H., Rasool A., Sajjad I.A., Cui Zhenhua, Ning L. Modeling and Analysis of the Dynamic Response of an Off-Grid Synchronous Generator Driven Micro Hydro Power System // International Journal of Renewable Energy Development. – 2021. – Vol. 10, no. 2. – Pp. 373–384.
- [8] Inter-turn Short-Circuit Faults in Permanent Magnet Synchronous Machines: An Extended Review and Comprehensive Analysis / Zafarani M., Bostanci E., Qi Y., Goktas T., Akin B. // IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics. – 2018. – Vol. 6, no. 4. – Pp. 2173–2195.
- [9] Fault detection of synchronous motor inter-turn short circuit based on second-harmonic features of dq-axis current. – 2025.
- [10] A Fault Feature Extraction Model in Synchronous Generator under Stator Inter-Turn Short Circuit Based on ACMD and DEO3S. – 2025.