

№ 6. ВІДДІЛ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ

УДК 621.313

ЕЛЕКТРИЧНІ ГЕНЕРАТОРИ І ДВИГУНИ ЗМІННОГО СТРУМУ. ЕЛЕКТРОМЕХАНОТРОННІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ЕНЕРГІЇ

Л.І. Мазуренко, докт. техн. наук, **О.В. Джура**, канд. техн. наук, **О.М. Попович**, канд. техн. наук, **В.В. Гребеніков**, канд. техн. наук, **О.В. Бібік**, канд. техн. наук, **І.В. Головань**, канд. техн. наук, **Ю.В. Шуруб**, канд. техн. наук, **А.П. Вербовий**, канд. техн. наук, **В.І. Романенко**
Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна

Наведено основні наукові і практичні результати відділу електромеханічних систем Інституту електродинаміки НАН України за 2012 рік, пов'язані з розробкою математичних моделей і методик розрахунку режимів, проектуванням і комплексним дослідженням автономних енергосистем на основі асинхронних генераторів з вентильним збудженням, асинхронних та вентильно-індукторних двигунів, електричних машин з постійними магнітами. Бібл. 25, таблиця.

Ключові слова: автономна енергосистема, асинхронний генератор, асинхронний двигун, машини з постійними магнітами, вентильно-індукторний двигун, математичні моделі, методики.

Роботи 2012 року відділу електромеханічних систем Інституту електродинаміки НАН України були спрямовані на розробку математичних моделей автономних енергосистем (АЕ) на основі асинхронних генераторів з вентильним збудженням (АГ з ВЗ), передаточних функцій генераторів як об'єктів керування та методик розрахунку робочих характеристик, методів розрахунку магнітного поля електричних машин з постійними магнітами, на уточнення математичних моделей асинхронних двигунів (АД) з урахуванням гармонік МРС та проектування їх конструкцій з масивними елементами магнітопроводу ротора, оптимізацію конструкцій та теоретичні й експериментальні дослідження вентильно-індукторних двигунів (ВІД) тощо.

Електричні генератори. *Математичні моделі автономних енергосистем.* Вітрові й вітродизельні автономні енергосистеми, побудовані на основі АГ з ВЗ [11], відповідають вимогам високої надійності й помірної вартості енергообладнання.

Для приводу таких АГ доцільно застосовувати дизельні двигуни (ДД) та нерегульовані вітротурбіни (ВТ) зі змінною частотою обертання. Енергосистеми, побудовані виключно з вітрогенераторів, є енергосистемами негарантованого живлення, оскільки їх функціонування практично цілком залежить від погодних умов. На протилежність від вітрогенераторних, вітродизельні АЕ дають змогу забезпечувати гарантоване живлення споживача.

Розробка АЕ потребує створення їх адекватних математичних моделей, необхідних для числових розрахунків. До складу моделей енергосистем з вітровими і дизельними приводними двигунами входять такі компоненти: моделі вітротурбіни, дизельного двигуна, часової зміни вітрового потоку, рівняння руху турбіни (дизельного двигуна), редуктора і генератора, моделі електричних машин, їх систем збудження і регулювання, моделі додаткових регуляторів вихідного струму АГ, накопичувачів енергії, баластного і основного навантаження.

Розроблено комплекс математичних моделей автономних енергосистем на основі АГ з ВЗ, що дають змогу досліджувати електромеханічні процеси АГ в усталених і перехідних режимах роботи.

1. Моделі автономних енергосистем постійного струму:

– модель системи з двох однообмоткових АГ, які приводяться в рух дизельними двигунами та живлять шину постійного струму при наявності й відсутності електрохімічних та механічних накопичувачів енергії;

– моделі зварювальних систем з однообмотковими АГ, які приводяться в рух ДД, збуджуються напівпровідниковими перетворювачами, що суміщають функції системи збудження і формувача зовнішньої характеристики, та мають додаткові регульовані опори в колі протікання зварювального струму;

– спрощена модель для дослідження статичних режимів двогенераторної системи, в якій однообмоткові АГ працюють на спільне навантаження при постійній частоті обертання роторів;

– моделі двогенераторної зварювальної енергосистеми, до складу якої входять два АГ. Кожен з них обертається від дизельного двигуна, має дві статорні обмотки, збуджується від індивідуального вентильного перетворювача та працює на спільне навантаження по колу постійного струму;

– модель вітродизельної енергосистеми, побудованої на основі двох АГ з вентильним збудженням, один з яких обертається від вітротурбіни з фіксованим кутом атаки лопастей та має додатковий регулятор вихідного струму, а інший обертається від дизельного двигуна;

– моделі вітроакумуляторної енергосистеми на основі двох АГ з вентильним збудженням, які приводяться в рух нерегульованими вітротурбінами.

2. Моделі автономних енергосистем змінного струму:

– моделі двогенераторної автономної енергосистеми трифазної змінної напруги, побудованої на основі асинхронних однообмоткових генераторів з елементами контролю їх активної і реактивної потужностей.

Математичний опис силової електричної частини автономних дизельних енергосистем постійного струму проведено на основі рівнянь асинхронних машин у трифазній системі координат з урахуванням нелінійності індуктивності взаємоіндукції та з застосуванням методу комутаційних функцій для опису роботи вентильних перетворювачів. У моделях автономних дизельних генераторів, враховуючи незначні коливання частоти обертання, використано ефективні дискретні (керуючий вплив змінюється шість разів за період основної частоти) частотні системи керування без зміни глибини модуляції з однократним перемиканням вентилів за період. Застосування дискретної моделі системи керування у порівнянні з неперервною дає перевагу в розрахунковому часі імітаційної моделі. Застосована спрощена модель дизельного двигуна дає змогу розраховувати в часі його момент залежно від рівня подачі палива, враховує усереднену затримку відпрацювання в контурі регулювання моменту та містить елементи зворотного зв'язку за частотою обертання. Для числового дослідження перехідних процесів у моделі дизельної АЕ передбачено додаткові ключі, якими генератори підключаються до мережі постійного струму.

Створені математичні моделі автономних зварювальних енергосистем на основі асинхронних генераторів з вентильним збудженням дають змогу досліджувати електромеханічні процеси в системі у режимах роботи на спільне навантаження, що потребує живлення струмом чи напругою, значення яких перевищують можливості окремих агрегатів. Зокрема, це можуть бути режими зварювання високолегованої сталі та плазмового різання. Відповідно розглянуто моделі енергосистем з однообмотковими асинхронними генераторами з ВЗ, які з'єднуються паралельно чи послідовно по колу постійного струму. Важливість дослідження двогенераторних зварювальних енергосистем на основі АГ з ВЗ і двома обмотками статора обумовлена тим, що наявність двох статорних обмоток в АГ дає змогу гальванічно розділити кола системи збудження і зварювального струму, отримати додатковий канал живлення допоміжного обладнання, зменшити струми напівпровідникових елементів системи збудження тощо. Так, отримано математичні моделі двох таких зварювальних АЕ, призначених для збільшення зварювального струму. Перша з отриманих моделей – модель системи, в якій генератори збуджуються від вентильних перетворювачів, підключених до високовольтних обмоток збудження, а їх силові робочі обмотки працюють через випрямлячі й додаткові регулятори на спільне навантаження [9]. Ця система для початкового пуску потребує наявності акумуляторної батареї. Друга модель – модель системи з початковим збудженням від конденсаторів, які лише тимчасово (протягом секунд) підключаються до малопотужної обмотки

збудження (потужність обмотки збудження на порядок менша, ніж силової обмотки), а надалі реактивним струмом генератори забезпечуються від багатофункціональних вентиляльних перетворювачів з додатковими опорами в колах зварювального струму, які підключені до силових обмоток асинхронних генераторів. Для такої системи акумуляторна батарея не потрібна, що є її суттєвою перевагою. Отримані моделі дають змогу в подальшому провести дослідження, тестування і оптимізацію електромеханічних процесів у розглянутих системах, сформулювати рекомендації щодо їх проектування.

Модель електричної частини асинхронних вітрогенераторів з ВЗ відрізняється наявністю додаткових рівнянь, які описують часові залежності струму баластного навантаження в колі постійного чи змінного струму та процеси в регуляторі потужності, яка віддається в мережу. Модель вітротурбіни базується на графічному (табличному) представленні сімейства її швидкісних характеристик з застосуванням 2D-інтерполяції для розрахунку поточної частоти обертання. Застосування вітротурбіни з фіксованим кутом атаки лопастей пояснюється підвищеною надійністю і меншою вартістю порівняно з регульованими турбінами. З використанням розробленої моделі базового рішення системи керування вітрогенератором отримано повну імітаційну модель генератора [10]. Вона дає змогу досліджувати особливості квазістатичних і перехідних процесів у елементах вітрогенератора при роботі на автономну мережу в режимі утримання вітротурбіни на максимумі її аеродинамічного ККД, проводити оцінку стійкості його роботи та в подальшому досліджувати стійкість вітроаккумуляторних АЕ, побудованих на основі таких джерел енергії.

Динамічні моделі вітродизельних і вітроаккумуляторних АЕ отримано на основі блочного принципу моделювання з застосуванням блоків "дизель - генератор", "вітротурбіна - генератор", "навантаження", "система керування" тощо. Для двогенераторних вітроаккумуляторних АЕ розроблено імітаційну модель спрощеного структурного рішення, згідно з яким один з генераторів низьковольтний, а інший високовольтний. Низьковольтний АГ у такій системі заряджає АБ та віддає енергію в мережу постійного струму через підвищуючий регулятор, а високовольтний АГ підключений на мережу без додаткових регуляторів.

Оскільки вентиляльні перетворювачі системи збудження вітрогенераторів з ВЗ працюють при високій частоті перемикачів, це може призводити до пришвидшеного старіння ізоляції обмотки статора. Запобігти цьому можна шляхом встановлення фільтруючих елементів. Завдяки їм напруги статора наближаються за формою до синусоїди. Для дослідження особливостей електромагнітних процесів у автономних генераторах з ВЗ і фільтруючими елементами в колах статора було розроблено відповідні математичні моделі.

Створено та протестовано комп'ютерні моделі для дослідження роботи силових частин зазначених вище автономних енергосистем постійного і змінного струмів.

Розроблені моделі є важливими для оптимізації електромагнітних процесів у елементах АЕ.

Передаточні функції АГ з ВЗ. Розроблено модель асинхронного генератора з вентиляльним збудженням у двофазній системі координат, орієнтованій за вектором напруги статора [13]. Вентильний перетворювач враховується по першій гармоніці, що відповідає умові сталості глибини модуляції (у випадку застосування векторної широтно-імпульсної модуляції). Для лінеаризації нелінійних функцій добутку частоти поля на змінні стану у вихідній системі диференціальних рівнянь застосовано розкладання цих функцій у ряд Тейлора в околі робочої точки з урахуванням перших двох членів ряду. Введення нової змінної, що є відносною різницею частоти поля й електричної частоти обертання ротора, дало змогу отримати лінійну модель АГ з ВЗ в околі робочої точки. Використання отриманої моделі дало змогу вперше отримати передаточні функції АГ з ВЗ як об'єкта керування, які в свою чергу дали змогу проаналізувати стійкість такої системи і встановити вирази коригуючих ланок струму і напруги. Математичне моделювання і експериментальні дослідження АГ з ВЗ підтвердили стійкість запропонованих регуляторів і показали аперіодичний характер регулювання вихідних величин.

Методика розрахунку робочих характеристик АГ з ВЗ. Проведено дослідження властивостей АГ з ВЗ і запропоновано методику розрахунку його робочих характеристик на основі Г-подібної схеми заміщення асинхронної машини з урахуванням втрат у вентиляльному перетворювачі [12]. Отримано вираз, який дає змогу обчислити величину опору навантаження в колі постійного струму залежно від параметрів машини, у тому числі від ковзання і індуктивного опору контура взаємоіндукції. Це дало змогу уточнити область стійкої роботи АГ з ВЗ і визначити мінімальне значення опору навантаження в колі постійного струму, при якому генератор не втрачає збудження.

Асинхронні двигуни. *Математичне та програмне забезпечення для комплексного дослідження режимів.* Проектування електромеханічних систем (ЕМС) потребує наявності відповідного математичного забезпечення.

Підвищено адекватність розроблених раніше [14] математичних моделей АД із визначенням параметрів за результатами польового аналізу при врахуванні гармонік МРС. Розроблено моделі для визначення параметрів за результатами польового аналізу при максимальному наближенні до синусоїдного просторового розподілу струмів статора. Це дало змогу при визначенні струмів ротора і втрат у ньому знизити похибку внаслідок впливу ЕРС за вищими просторовими гармонічними складовими МРС статора і підвищити точність визначення параметрів заступної схеми. Синусоїдність просторового розподілу струмів статора з необхідним періодом забезпечується формуванням синусної обмотки у пазах статора.

Вплив селективного врахування просторових гармонічних складових магнітного поля на величину параметрів заступної схеми АД при їх визначенні за результатами польового аналізу оцінено на прикладі розрахунку залежностей зведеного індуктивного опору пазового розсіювання ротора x'_{2n} двигуна 4А80А2У3 у функції частоти і модуля зведених струмів ротора. Залежності отримано у разі еквівалентування польової моделі коловою [14] за результатами польового аналізу без врахування процесів у лобових частинах ротора та скосу його пазів.

Показано вагомість уточнення визначення параметрів заступної схеми з урахуванням спектра просторових гармонік МРС. Так, у номінальному режимі величина параметра x'_{2n} уточнюється приблизно на 15 %.

Виконано порівняльний аналіз результатів математичного моделювання характеристик АД за розробленою математичною моделлю, яка враховує нелінійності електромагнітних параметрів за результатами польового аналізу, і за параметрами, наведеними у відповідних каталогах.

Зроблено кількісну оцінку уточнень результатів розрахунку параметрів робочих режимів при врахуванні нелінійності електромагнітних параметрів за розробленою методикою. Так, у пусковому режимі результати визначення як струму, так і моменту суттєво наближаються до даних каталогу. Це обумовлено врахуванням зменшення головного індуктивного опору у пусковому режимі. Сталість цього параметра не дає змоги отримати високу точність методики розрахунку пускових режимів: розрахунок пуску з каталоговими параметрами короткого замикання забезпечує потрібну точність за струмом, але точність визначення моменту падає. Результати розрахунку номінального режиму зі сталими і змінними параметрами практично збігаються. Дещо занижені розрахункові величини струмів статора пояснюються неврахуванням втрат у сталі, а завищені розрахункові величини моменту – неврахуванням механічних втрат. Чисельні результати порівняльного аналізу зведено до таблиці.

Режим роботи		Момент		Струм статора		
		Нм	Відхилення від каталогових даних, %	А	Відхилення від каталогових даних, %	
Номінальний	Розрахунок	каталогові дані	5	–	30,3	–
		номінальні параметри (за довідником)	50,12	2,4	30,01	8,8
		змінні параметри (за польовим аналізом)	50,13	2,6	30,14	4,9
Пусковий	Розрахунок	каталогові дані	10,5	–	21,5	–
		номінальні параметри (за довідником)	90,6	8,6	18,45	14,2
		пускові параметри (за довідником)	12,45	18,6	20,7	3,7
		змінні параметри (за польовим аналізом)	11,07	5,4	20,5	4,7

Асинхронні машини з масивними елементами магнітопроводу ротора. Особливістю трубопровідного транспорту деяких сортів нафти є велика залежність гідравлічного опору нафтопроводу від в'язкості нафти, яка у свою чергу залежить від температури. Збільшення гідравлічного опору при зниженні температури призводить до зниження енергоефективності транспортування нафти. Ці особливості обумовлюють застосування «гарячого» перекачування нафти. Значно підвищити ККД нагріву, позбутися додаткового нагрівального обладнання можливо при суміщенні джерел механічної, гідравлічної та теплової енергії в одному пристрої і розміщенні його всередині нафтопроводу. Для розв'язання цієї задачі розроблено конструкцію мотор-насоса для транспортування та нагрівання рідини [20]. Розроблена система складається з вбудованого асинхронного двигуна з зовнішнім масивним ротором, який суміщено з робочим колесом віседіагонального шнекового насоса. Облаштування асинхронного двигуна масивним феромагнітним ротором забезпечує потрібний рівень теплових втрат у роторі, а виконання його зовнішнім із поверхнею у вигляді лопаток робочого колеса насоса сприяє мінімізації теплового опору для потоку енергії від зони тепловиділення у повітряному проміжку до поверхні теплообміну між робочим колесом і нафтою. Ефективність нагрівання забезпечується також і розміщенням джерела тепла в середині потоку нафти.

Електротепломеханічна система транспортування нафти нафтопроводом із вбудованими мотор-насосами є альтернативою існуючим способам перекачування нафти з підігрівом. При цьому дискретність розміщення вбудованих мотор-насосних вузлів збільшується залежно від ступеня стабілізації температури нафти. Економію енергії на підігрівання може бути оцінено на рівні 50 % порівняно з існуючим способом. Крім збільшення ККД нагріву підвищення енергоефективності досягається корисним використанням втрат у приводних двигунах насосів. Такий чинник забезпечує економію 7...9 % енергії. Застосування вбудованих мотор-насосів у нафтопроводах знижує максимум тиску у трубопроводі пропорційно ступеню збільшення кількості насосів. Наслідком такої зміни є збільшення надійності, подовження ресурсу трубопроводу, можливість збільшити продуктивність нафтопроводу. Збільшення продуктивності забезпечується шляхом збільшення швидкості, зменшення питомих втрат тепла в навколишнє середовище, збільшення енергоефективності транспортування нафти.

Запропоновано багат шаровий ротор АД з масивними елементами магнітопроводу та розділеним короткозамикаючим кільцем [19], що забезпечує покращення пускових та робочих властивостей АД при збільшенні діапазону зміни активного опору ротора. Тришаровий масивний ротор асинхронного двигуна складається з вала, на якому розміщено циліндричне шихтоване осердя, зовні якого розміщено першу масивну феромагнітну втулку, на якій розміщено другу масивну феромагнітну втулку з приєднанням до них торцевих короткозамикаючих кілець, що відокремлені одне від одного на деяку відстань у радіальному напрямку.

Масивні феромагнітні втулки мають наскрізні прорізи в осьовому напрямку, за винятком центральної та торцевих зон, причому першу втулку виконано з матеріалу з більшою провідністю, ніж другу. Відокремлення короткозамикаючих кілець на деяку відстань у радіальному напрямку дає змогу досягти нового технічного результату, що полягає у збільшенні діапазону зміни активного опору, і як наслідок, покращення використання габаритної потужності та енергетичних показників АД.

Методика статистично оптимального синтезу замкнутих систем електроприводу.

Одним з напрямів підвищення енергоефективності роботи асинхронних електроприводів при випадковому характері зміни навантажень є створення замкнутих систем електропривода, таких як «перетворювач частоти – асинхронний двигун», «перетворювач напруги – асинхронний двигун», із статистично оптимальними регуляторами, які б враховували стохастичний характер збурень та виступали як фільтри випадкових високочастотних коливань (пульсацій) навантаження.

Розроблено методику [16, 17] для синтезу статистично оптимальних регуляторів замкнутих електроприводів сільського, комунального господарства, особливою якої є розкладання випадкового процесу навантаження на середнє значення $\bar{M}_c(t)$, що подається як корисний сигнал, та високочастотні флуктуації навколо середнього значення $M_c(t)$, що подаються як перешкоди – центрований випадковий процес. При цьому сам регулятор можливо також подати у вигляді двох частин, одна з яких оптимізує енергоспоживання при дії статичного моменту $\bar{M}_c(t)$ (пропорційно-інтегруюча (ПІ) складова регулятора), а друга компенсує дію високочастотних флуктуацій $M_c(t)$ (статистично оптимальна складова регулятора). Одержано частотну передаточну функцію статистично оптимальної замкнутої системи електропривода.

Аналіз цієї передаточної функції для навантажень з експоненціальною та експоненціально-косинусними кореляційними функціями показав, що вона має додатні полюси по змінній $j\omega$. Отже, згідно з загальними умовами стійкості така система є нестійкою [2] і відповідно не може бути фізично реалізована. Для коректного розв'язання цієї задачі слід виділити частину частотної передаточної функції, що має від'ємні полюси, а іншу частину відкинути, що може бути здійснено за допомогою математичних операцій «факторизації» та «розщеплення». Такий підхід дав змогу отримати найбільш близьку до оптимальної частотну передаточну функцію замкнутого електропривода з фільтрацією високочастотних флуктуацій навантаження, що задовольняє умовам стійкості роботи замкнутих систем керування та може бути фізично реалізована.

Оцінено резерви енергоспоживання при застосуванні методів статистично оптимального синтезу асинхронних електроприводів з випадковим характером зміни навантаження.

Встановлено збільшення циклового ККД та коефіцієнта потужності електропривода за системою «перетворювач напруги – асинхронний двигун» зі статистично оптимальним регулятором порівняно як із нерегульованим електроприводом, так і з регульованим приводом, в якому застосовується традиційний для оптимальних за енергоспоживанням електроприводів пропорційно-інтегральний регулятор (ПІ-регулятором), характеристики якого визначені з умов статичного режиму.

Вентильно-індукторні машини. Запропоновано комплексний підхід до оптимізації конструкції ВІД. Проведено оптимізаційні розрахунки конструкції ВІД з метою визначення максимальних значень електромагнітного моменту і мінімуму пульсацій сумарного електромагнітного моменту та визначено оптимальну геометрію двигуна із співвідношенням числа полюсів статора і ротора 6/4.

Із застосуванням розробленої математичної моделі розраховано електромагнітні процеси ВІД. Для отримання аналітичної залежності максимального і середнього моментів ВІД при заданій величині зовнішнього діаметру магнітопровода при варіюванні діаметром розточування і кутовою величиною полюса статора та поодинокій комутації використано метод

планування експерименту. Електромагнітний момент при різних конфігураціях магнітної системи ВІД розраховано методом кінцевих елементів. При цьому для досліджуваних конфігурацій визначено картину поля, величини магнітної індукції в зазорі та електромагнітний момент ВІД при різних кутах повороту ротора.

Встановлено особливості проектування ВІД, що працюють у приводах поршневих компресорів, з урахуванням їх моменту опору та запропоновано методику їх проектування [1].

Створено експериментальний стенд для дослідження характеристик вентильно-індукторного двигуна.

За результатами експериментальних досліджень встановлено:

- характеристики квазістатичних режимів ВІД залежать від величини напруги кола постійного струму, кутів комутації фаз (кута вмикання і вимикання), величини струмообмеження. Використання оптимальних їх величин дає змогу знизити рівень пульсацій електромагнітного моменту і частоти обертання ротора;

- регульовальні характеристики ВІД $\omega = f(U_d)$ практично лінійні, тому для стабілізації частоти обертання при змінах статичного моменту необхідно змінювати напругу джерела постійного струму U_d пропорційно навантаженню. Для регулювання швидкості ВІД із забезпеченням сталості моменту можна скористатися пропорційним законом М.П. Костенко ($U_d / \omega \approx const$) для керування асинхронними електродвигунами;

- експериментальний зразок ВІД конфігурації 6/4 з використанням комутатора з С-скиданням і коливальним повертанням енергії має кращі енергетичні показники ($\eta = 74\%$ при $U = 200$ В) у порівнянні з асинхронним двигуном 4AA56A4Y3 ($\eta = 63\%$ при $U = 200$ В);

- зразок ВІД забезпечує необхідний діапазон регулювання частоти обертання 1:5 (3000 об/хв : 600 об/хв) для поршневих компресорів із кривошипно-кулісним механізмом типу ХКВ, який має вертикально розташований вал, з'єднаний з вихідним валом двигуна, і обертається з частотою 3000 об/хв;

- вентильно-індукторний двигун забезпечує надійний плавний пуск при зниженні напруги до $0,4U$ ($U = 200$ В).

Електричні машини з постійними магнітами. Використання постійних магнітів (ПМ) в електричних машинах дає змогу успішно розробляти конструкції, які мають високі показники питомої електромагнітної енергії [3 – 8, 15, 18].

Виконано порівняльний аналіз чотирьох моделей електричних машин з ПМ. Показано, що при однакових габаритних розмірах найбільший електромагнітний момент досягається у моделі з явно вираженими полюсами на статорі й тангенціальним намагнічуванням постійних магнітів на роторі [7]. Моделювання магнітного поля і розрахунок залежності електромагнітного моменту від кута повороту ротора, виконаного у дво- (ELCUT 5.6) і тривимірній (COMSOL 3.5) постановках, виявило, що середнє значення електромагнітного моменту відрізняється не більше 10 %. Отже, на стадії попереднього проектування достатньо моделювати поле у двовимірній постановці.

Недоліком методу кінцевих елементів є незадовільна швидкість його роботи при проведенні великої кількості розрахунків, що повторюються, з прийнятною точністю. Саме через це з'явилась необхідність у розробці методу розрахунку магнітного поля, який дасть змогу виконувати серії розрахунків на порядок швидше, ніж методом кінцевих елементів [3, 4]. Запропоновано аналітичний метод розв'язання рівнянь магнітостатики для середнього перерізу магнітопровода електричної машини з ПМ на роторі. Використання аналітичних виразів для опису параметрів електричних машин, таких як індукція у повітряному зазорі, крутний момент, поточкозчеплення, надає додаткові можливості при досліджуванні.

Запропоновано математичний метод розрахунку магнітного поля дискової електричної машини з ПМ [3]. Розроблена комп'ютерна програма, яка реалізує описаний метод, дає змогу відображати картини магнітного поля, будувати графіки електромагнітної індукції та її складових вздовж заданої лінії, розраховувати значення зусиль і моменту, що діють на ротор електродвигуна. Порівняння результатів розрахунку основних характеристик електромагніт-

ного поля дискового електродвигуна з ПМ, отриманих аналітичним методом, а також за допомогою методу кінцевих елементів у програмних комплексах ELCUT 5.6 і COMSOL 3.5, показало, що для досліджуваної моделі електродвигуна розбіжність складає не більш 5 %.

На основі запропонованого методу і розробленої комп'ютерної програми можна вирішувати задачі по розрахунку магнітних полів у двовимірній постановці, а також проводити оптимізаційні розрахунки магнітних систем. У роботі [4] здійснено оптимізаційний розрахунок генератора з ПМ дискового типу при фіксованих зовнішніх габаритах. Показано оптимальне співвідношення між висотою магнітів і обмоток: висота постійних магнітів дорівнює сумарній висоті обмоток.

Для електроживлення віддалених від енергомереж об'єктів невеликої потужності доцільно встановлювати автономні системи на основі вітро- і гідроенергетичних установок [5, 8, 15, 18, 25]. Для установок малої потужності використовуються синхронні електрогенератори на основі рідкоземельних постійних магнітів [8]. Вартість виготовлення електрогенератора може бути зменшена за рахунок використання статора серійного асинхронного двигуна, а також рішень, що забезпечують будь-яку товщину ПМ [24]. Товщини магнітів впливають на величину його електромагнітного моменту. Проведено чисельні дослідження електромагнітного моменту при варіації товщини ПМ і виявлено їх раціональну товщину, виходячи з важливого критерію – вартість електрогенератора / величина електромагнітного моменту [8].

При дослідженні електрогенератора з ПМ було встановлено нагрівання підшипникових щитів. Дослідження поля в 3D моделях у програмному пакеті COMSOL 3.5 показало, що торцеві потоки розсіювання постійних магнітів ротора замикаються через елементи конструкції статора, які знаходяться співвісно з ротором і при обертанні ротора наводять у них вихрові струми, величина яких залежить від числа обертання ротора. Вихрові струми спричиняють теплові втрати в конструкціях ротора, у тому числі й в підшипникових щитах, що призводить до зменшення енергетичних показників електрогенератора, а нагрівання підшипників – до зменшення ресурсу його роботи [8].

Для зменшення нагрівання підшипникових щитів і покращення енергетичних показників електрогенератора рекомендовано використовувати два феромагнітні диски, що закріплюються співвісно з ротором і нерухомо по відношенню до нього на відстані, більшій величини повітряного зазору. Зовнішній діаметр дисків не менше діаметра ротора, а внутрішній – не більше внутрішнього діаметра шару постійних магнітів [23].

Для вітро- і гідроенергетичних установок малої потужності можуть бути використані синхронні електрогенератори з ПМ дискового типу. Проведено пошук оптимальних геометричних розмірів магнітної системи електрогенератора при використанні двох типів магнітів: феритових і ніодімових. Визначено розміри, які відповідають мінімальній вартості магнітної системи як для генератора зі збудженням від феритових ПМ, так і для генератора зі збудженням від ніодімових ПМ. Показано спосіб збільшення потужності електрогенератора при використанні між обмотками феромагнітних концентраторів. Такі концентратори підвищують значення магнітної індукції у повітряному зазорі, а отже, електромагнітний момент і потужність електрогенератора. Виконано розрахунок характеристики холостого ходу електрогенератора з ПМ, а також режим роботи з навантаженням, який відповідає потужності на валу $P = 4,5$ кВт. Визначено залежність фазної напруги від часу при рівномірному обертанні ротора зі швидкістю $n = 100$ об/хв.

Оскільки досліджувані електричні машини з ПМ циліндричної і дискової конфігурації характеризуються поліпшеними масогабаритними, енергетичними і віброакустичними показниками, їх розробка і застосування в промисловості є одним з ключових засобів при створенні електромеханотронних перетворювачів енергії на основі синтезу сучасних досягнень у галузі електромеханіки, електроніки і комп'ютерного керування.

Потенційні споживачі одержаних наукових і науково-технічних результатів: електромашинобудівні підприємства, які виготовляють електричні машини та електромеханічні комплекси на їх основі для застосування в енергетиці й автоматичній, транспортній, будівничій, сільському господарстві тощо.

За звітний період опубліковано 18 статей і доповідей на міжнародних науково-технічних конференціях, одержано сім патентів на винахід.

У 2013 році планується розробити принципи і алгоритми керування АГ з ВЗ при їх паралельній роботі та дослідити особливості такої роботи, провести аналіз та класифікацію структур ЕМС з АД і напівпровідниковими перетворювачами з урахуванням особливостей обмоток, конструктивних схем магнітопроводів, характеристик електротехнічних матеріалів, розробити математичну модель для аналізу перехідних процесів електромеханотронного перетворювача енергії з ПМ та ефективні алгоритми його керування, провести дослідження і аналіз існуючих засобів покращення технічних характеристик насосних і вентиляторних установок та виявити перспективні шляхи, що забезпечать розробку нових засобів.

1. Бібік О.В., Мазуренко Л.І., Жуков Л.О. Дослідження квазістатичних режимів вентиляно-індукторних двигунів з періодичним навантаженням // Електромеханічні та енергозберігаючі системи. Темат. вип. "Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика". – Кременчуцький національний університет. – 2012. – № 3/19. – С. 416–418.
2. Головінський Б.Л., Шуруб Ю.В., Лисенко В.П. Теорія автоматичного управління: Навч. посіб. – К.: Вид. Центр НУБіП України, 2012. – 240 с.
3. Гребеников В.В., Гамалея Р.Р. Аналитический метод расчета магнитного поля и моментов электродвигателя с постоянными магнитами дискового типа // Техн. електродинаміка. – 2012. – № 3. – С. 93–94.
4. Гребеников В.В., Гамалея Р.Р. Моделирование магнитостатического поля и переходных процессов электрогенератора дискового типа с постоянными магнитами // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАН України. – 2012. – Вип. 33. – С. 30–38.
5. Гребеников В.В., Гамалея Р.Р., Пріймак М.В., Шымчак П.П. Сравнительный анализ дисковых электрогенераторов для малой энергетики на основе ферритовых и ниодимовых магнитов // Гідроенергетика України. – 2012. – № 4. – С. 16–21.
6. Гребеников В.В., Пріймак М.В. Расчет магнитного поля и момента магнитоэлектрической машины с явно выраженными полюсами на статоре // Техн. електродинаміка. – 2012. – № 2. – С. 83–84.
7. Гребеников В.В., Пріймак М.В., Зарицкая Е.И. Анализ характеристик вентиляльных электродвигателей с зубцово-пазовой и явнополюсной конфигурацией статора // Вісник СевНТУ: Зб. наук. пр. Вип. 132/2012. Серія: Механіка, енергетика, екологія. – 2012. – С. 196–203.
8. Гребеников В.В., Шымчак П.П., Пріймак М.В. Исследование электрогенератора с постоянными магнитами для малой ветро- и гидроэнергетики // Гідроенергетика України. – 2012. – № 3.
9. Мазуренко Л.І., Джура О.В., Романенко В.І., Білик О.А. Розрахункове дослідження асинхронних генераторів з двома статорними обмотками в складі зварювальних комплексів з широтно-імпульсними регуляторами струму // Техн. електродинаміка. – 2012. – № 3. – С. 83–84.
10. Мазуренко Л.І., Джура О.В., Романенко В.І., Диннік Л.М., Білик О.А. Машиновентильне джерело постійної напруги для автономних енергосистем // Електромеханічні та енергозберігаючі системи. Темат. вип. "Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика". – Кременчуцький національний університет. – 2012. – № 3/19. – С. 331–335
11. Мазуренко Л.І., Джура О.В., Попович О.М., Гребеніков В.В., Бібік О.В. та інші. Автономні енергосистеми. Електричні машини змінного струму та електромеханічні системи на їх основі // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАН України. – 2012. – Вип. 32. – С. 58–66.
12. Мазуренко Л.І., Романенко В.І., Джура О.В. Дослідження статичних характеристик автономного асинхронного зварювального генератора з вентиляним збудженням по Г-подібній схемі заміщення // Техн. електродинаміка. – 2012. – № 2. – С. 75–76.
13. Мазуренко Л.І., Романенко В.І., Джура О.В. Передаточна функція автономного асинхронного генератора з вентиляним збудженням // Електромеханічні та енергозберігаючі системи. Темат. вип. "Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика". – Кременчуцький національний університет. – 2012. – № 3/19. – С. 412–415.
14. Попович О.М., Головань І.В. Визначення параметрів заступної схеми асинхронного двигуна та їх нелінійної залежностей за результатами польового аналізу // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. праць. – К.: ІЕД НАН України, 2012. – Вип. 31. – С. 38–48.
15. Трегуб Н.И., Гребеников В.В., Пріймак М.В. Обоснование типов и параметров электрогенераторов для безредукторных ветроэлектрических установок // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАН України, 2012. – Вип. 31. – С. 62–73.
16. Шуруб Ю.В. Розробка системи керування трифазно-однофазних асинхронних електроприводів при випадкових навантаженнях // Електромеханічні та енергозберігаючі системи. – 2012. – Вип. 1(17). – С. 12–15.
17. Шуруб Ю.В. Синтез регуляторів асинхронних електроприводів при випадкових збуреннях // Проблеми розвитку систем енергетики і автоматики в АПК: Міжнародна науково-технічна конференція до 80-

- річчя заснування факультету енергетики і автоматики, Київ, 25-26 жовтня 2012 р. – К.: НУБіП України, 2012. – С. 77–78.
18. *Piotr Szymczak, Viktor Grebenikov. Generator z magnesami trwalimi do malych elektrowni wiatrowych wodnych // Wiadomosci elektrotechniczne. – 2012. – № 11. – С. 36–39.*
 19. *Пат. на корисну модель UA 77285. H02K01/22. Тришаровий масивний ротор асинхронного двигуна / О.М. Попович, І.В. Головань // Промислова власність. – 2013. – Бюл. № 3.*
 20. *Пат. на корисну модель UA 77357. H02K17/00, H05B06/10. Мотор-насос трансформаторно-асинхронної системи для транспортування та нагрівання рідини / О.М. Попович, А.П. Вербовий, І.В. Головань // Промислова власність. – 2013. – Бюл. № 3.*
 21. *Пат. RU 2444046. МПК H01H21/31, H02P13/00. Привод устройства регулирования напряжения силового трансформатора под нагрузкой / В.В. Гребеников, С.М. Кацалан, С.М. Рассальская – 2012. – Бюл. № 6.*
 22. *Пат. на корисну модель UA 69242. МПК H02K21/14. Електрична машина з постійними магнітами / В.А. Барабаш, М.В. Богаєнко, В.В. Гребеніков, В.С. Попков // Промислова власність. – 2012. – Бюл. № 8.*
 23. *Пат. на корисну модель UA 69243. МПК H02K 21/14. Електрична машина з постійними магнітами / В.А. Барабаш, М.В. Богаєнко, В.В. Гребеніков, В.С. Попков, М.В. Приймак // Промислова власність. – 2012. – Бюл. № 8.*
 24. *Пат. UA 99683. МПК H02K21/14, H02K01/27. Електрична машина з постійними магнітами / В.А. Барабаш, М.В. Богаєнко, В.В. Гребеніков, В.С. Попков // Промислова власність. – 2012. – Бюл. № 17.*
 25. *Пат. UA 71835. МПК H02K21/14. Магнітоелектричний аксіальний генератор / М.І. Трегуб, В.В. Гребеніков, М.В. Приймак // Промислова власність. – 2012. – Бюл. № 14.*

УДК 621.313

Л.І. Мазуренко, докт. техн. наук, **А.В. Джура**, канд. техн. наук, **А.Н. Попович**, канд. техн. наук, **В.В. Гребеников**, канд. техн. наук, **Е.В. Бибик**, канд. техн. наук, **І.В. Головань**, канд. техн. наук, **Ю.В. Шуруб**, канд. техн. наук, **А.П. Вербовий**, канд. техн. наук, **В.І. Романенко**

Институт электродинамики НАН Украины,

пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина

Електрические генераторы и двигатели переменного тока. Электромехатронные преобразователи энергии

Приведены основные научные и практические результаты отдела электромеханических систем Института электродинамики НАН Украины за 2012 год, связанные с разработкой математических моделей и методик расчета режимов, проектированием и комплексным исследованием автономных энергосистем на основе асинхронных генераторов с вентильным возбуждением, асинхронных и вентильно-индукторных двигателей, электрических машин с постоянными магнитами. Библиография 25, таблица.

Ключевые слова: автономная энергосистема, асинхронный генератор, асинхронный двигатель, машины с постоянными магнитами, вентильно-индукторный двигатель, математические модели, методики.

L.I. Mazurenko, O.V. Dzhura, O.M. Popovych, V.V. Grebenikov, O.V. Bibik, I.V. Golovan, Yu.V. Shurub, A.P. Verbovyi, V.I. Romanenko

Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine,

Peremogy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

Electric generators and motors of alternating current. Electromechatronic energy converters

The basic scientific and practical results of the department of electromechanical systems of Institute of electrodynamics NASU for the 2012 year related to development of mathematical models and methods of computation of the modes, to development and complex investigation of autonomous power systems based on induction generators with electronic excitation systems, induction and switched reluctance motors, electric machines with permanent magnet. References 25, table.

Key words: autonomous power system, induction generator, induction motor, machines with permanent magnets, switched reluctance motor, mathematical models, methods.

Надійшла 5.04.2013

Received 5.04.2013