

РОЗВИТОК ТЕОРІЇ, ВДОСКОНАЛЕННЯ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ, ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН І ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ

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

Наведено основні наукові та практичні результати відділу електромеханічних систем Інституту електродинаміки НАН України за 2013 рік, пов'язані з паралельною роботою асинхронних генераторів з вентильним збудженням у складі автономних енергосистем, вдосконаленням математичних моделей, методів аналізу процесів, методик проектування і дослідженням електромеханічних систем на основі асинхронних і вентильно-індукторних двигунів, електричних машин з постійними магнітами. Бібл. 21, рисунок.

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

Роботи 2013 року відділу електромеханічних систем Інституту електродинаміки НАН України були спрямовані на дослідження особливостей паралельної роботи та розробку принципів і алгоритмів керування асинхронних генераторів з вентильним збудженням (АГ з ВЗ) у складі автономних енергосистем, вдосконалення математичних моделей і методик проектування електромеханічних систем з асинхронними двигунами (АД), наукове обґрунтування оптимальних структур магнітних систем, розробку математичних моделей і аналітичного методу розрахунку процесів електричних машин з постійними магнітами, дослідження і аналіз існуючих засобів покращення технічних характеристик електроприводів насосних і вентиляторних установок.

Автономні генеруючі системи. Проведено дослідження особливостей паралельної роботи АГ з ВЗ у системах автономного енергопостачання. Вирішені наукові задачі, пов'язані зі створенням і ефективним функціонуванням таких систем [5, 7, 8, 10–12]. Зокрема, розроблено принципи і алгоритми керування АГ з ВЗ під час паралельної роботи в складі автономних енергосистем (АЕ) з дизельними, вітро- та гідротурбінними приводами.

Більша частина досліджень зосереджувалась на АЕ постійного струму, в яких більш просто здійснюється контроль розподілу потужності між генераторами, менш жорсткі вимоги до стабільності частоти обертання дизелів, АГ з ВЗ не потребують додаткових перетворювачів під час паралельної роботи по колу постійного струму оскільки мають вихід постійного струму.

Під час розробки алгоритмів керування АГ з ВЗ у складі АЕ постійного струму було визначено:

– контроль розподілу потужності між генераторами, їх увімкнення та відімкнення від мережі доцільно здійснювати, виходячи з оптимальних графіків навантаження, отриманих за критерієм мінімуму експлуатаційних витрат АЕ;

– під час визначення заданих вихідних потужностей АГ необхідно оперувати прогнозом (середньою в усталеному режимі) потужністю споживачів, а не її миттєвим значенням;

– в агрегатах з постійною частотою обертання за високих напруг в колі постійного струму доцільно застосовувати частотне керування вентильним перетворювачем і однократне перемикання вентилів за період основної частоти;

– в агрегатах зі змінною частотою обертання є доцільним застосовувати алгоритми частотного керування з багаторазовим перемиканням вентилів за період основної частоти та алгоритми векторного керування;

– підключення АГ до мережі здійснюється після його збудження в момент досягнення величини напруги, заданої блоком контролю розподілу потужності (БКРП), а відімкнення – після зменшення вихідної потужності цього генератора до певного значення;

– в енергоблоках з нерегульованою вітротурбіною екстремальне керування потужністю турбіни найбільш доцільно виконувати окремим блоком у складі векторної системи керування АГ;

– регулятори частоти ковзання АГ з ВЗ за частотного керування повинні виконуватись зі змінними коефіцієнтами підсилення для обмеження величини перерегулювання електромагнітного моменту в перехідних режимах;

– регулятори частоти обертів дизеля і напруги АГ повинні розроблятися у комплексі з урахуванням взаємного впливу;

– у вітроакумуляторних АЕ для дотримання зарядно-розрядного циклу і ефективного використання енергії вітру за його поривчастого характеру акумуляторна батарея комплектується з двох секцій, керування якими виконується в протифазі (у той час, коли перша заряджається, друга розряджається, і навпаки);

– система керування баластним навантаженням повинна проектуватися таким чином, щоб забезпечувати плавне регулювання споживаної потужності й унеможливити нетривалі ввімкнення дизеля (менш ніж на 15–20 хв) та менші за 30–35 % від номіналу тривалі навантаження на його валу.

Встановлено, що пульсації електромагнітного моменту АГ з ВЗ, викликані дискретністю зміни напруги статора, можуть призводити до автоколивальних процесів в АЕ. Для уникнення цього запропоновано та випробувано підхід, згідно з яким електронний регулятор частоти обертів дизеля і регулятор частоти ковзання АГ мають змінні коефіцієнти підсилення окремих ланок. Завдяки цьому досягається стійка робота в усталених режимах за задовільних показників перехідних процесів навіть у режимах, наближених до холостого ходу. Синтез передаточної функції електронного регулятора обертів дизеля, яка найбільш впливає на якість перехідних процесів, здійснено за методом логарифмічних амплітудно-частотних характеристик (ЛАЧХ) на основі схеми заміщення дизеля.

Розроблено методику та програми для розрахунків графіків розподілу навантаження між АГ з ВЗ дизельної АЕ, які використовуються в БКРП енергосистем. За критерій оптимальності прийнято мінімум витрат пального дизельними агрегатами в усталених режимах роботи. Досліджено вплив добового графіка навантаження таких АЕ на витрати пального дизельними агрегатами. Показано, що за певних конфігурацій АЕ (за певних співвідношень потужностей АГ) дизельна АЕ може мати кращий показник питомої витрати палива, ніж аналогічна за кількістю і потужностями агрегатів дизель-акумуляторна АЕ.

Розроблені алгоритми керування дизельної двоагрегатної АЕ номінальною потужністю 125 кВт на основі АГ з ВЗ під час однократного алгоритму перемикання вентилів за період забезпечують стійку роботу АЕ, провал напруги в перехідних процесах до 11 %, час встановлення заданого розподілу потужностей 1,5...2 с. Для покращення якості перехідних процесів запропоновано ступінчасто змінювати перерозподіл потужності між АГ під час зміни навантаження та використовувати векторні системи керування АГ.

Розроблено алгоритм керування автономною енергосистемою змінного струму, в якій основним джерелом енергії є АГ з параметричним компенсатором реактивної потужності та приводом від гідротурбіни, а АГ з ВЗ та приводом від дизеля підключається до автономної мережі через трифазний інвертор і покриває різницю між потужністю навантаження і номінальною потужністю гідрогенератора. Створено комп'ютерну модель для тестування зазначеного алгоритму.

Проаналізовано теоретичні основи та блок-схеми алгоритмів керування асинхронних машин з короткозамкненим ротором з метою їх адаптації до вирішення задач керування АГ з

ВЗ. Розроблено структурну схему векторного керування АГ з ВЗ з блоком векторної ШІМ, яка може працювати під час зміни частоти обертання і забезпечує стабілізацію вихідної напруги постійного струму. На основі запропонованого математичного апарата розроблено векторну бездатчикову систему керування автономним АГ з ВЗ з блоком векторної ШІМ, який може працювати за змінної частоти обертання. Наведено рекомендації щодо налагодження зазначеної системи та розроблено математичну модель для її дослідження. Для тестування бездатчикової векторної системи керування АГ з ВЗ створено комп'ютерну модель з урахуванням зв'язків між системою керування, генератором, навантаженням та вентиляним перетворювачем, який працює за алгоритмом векторної ШІМ. Встановлено, що запропонована блок-схема алгоритму роботи системи керування АГ з ВЗ забезпечує аперіодичний характер протікання перехідних процесів з перерегулюванням не більше 6 % із часом встановлення фазної напруги менше періоду.

Розроблено принципи і алгоритми керування кількома АГ з ВЗ у складі автономних енергосистем загальнопромислового призначення з приводом від дизелів і вітротурбін, водного та наземного транспорту з дизельними агрегатами з використанням акумуляторних батарей, які базуються на критеріях мінімуму питомих витрат палива, максимуму потужності вітротурбін, максимального терміну експлуатації наявних акумуляторних батарей. При цьому забезпечуються умови енергоефективного функціонування АГ під час паралельної роботи.

Електромеханічні системи з асинхронними двигунами. *Уточнення параметрів асинхронної машини за результатами польового аналізу.* Математична модель визначення параметрів заступної схеми асинхронного двигуна за результатами польового аналізу в площині листів магнітопроводу [13] спирається на визначення комплексів струмів стержнів ротора інтегруванням густини струму за перетином і знаходження першої симетричної складової z_2 -фазної системи комплексів із зведенням її до дійсної осі комплексної площини. Під час аналізу процесів у АД із конструкцією і режимом роботи, які не передбачають суттєвого прояву ефекту витіснення струму у пазах ротора, перевірка адекватності визначених параметрів заступної схеми [14] показує практично повне співпадіння за результатами розрахунків робочих режимів, а також відповідність каталогових значень параметрів заступної схеми значенням цих параметрів за результатами польового аналізу. За суттєвого прояву ефекту витіснення струму у пазах ротора (АД із частотозалежними параметрами: глибокопазні, з масивними елементами магнітопроводу) у деяких випадках має місце невідповідність за величинами параметрів заступної схеми за збереження співпадіння за результатами розрахунків робочих режимів.

Для підвищення адекватності розрахованих параметрів заступної схеми у випадку частотозалежних параметрів ротора запропоновано визначити струм ротора колової моделі із залученням додаткових умов і додаткової інформації за результатами польового аналізу. Струм ротора у математичній моделі є комплексною величиною, і для його визначення залучено два додаткових рівняння, для формування яких сформульовано дві додаткових умови еквівалентування польової моделі коловою.

Для отримання першої додаткової умови розроблено методологію еквівалентування за величиною основного потоку. Реалізація цієї умови спирається на використання гармонічного аналізу як засобу селекції впливу потоків: основного і зігзагрозсіювання на характеристики магнітного поля у повітряному проміжку. Підставою для цього є різна просторова періодичність зміни цих потоків. Величину основного потоку визначено за результатами польового аналізу під час гармонічного аналізу залежності зміни миттєвого значення радіальної складової вектора індукції у повітряному проміжку. Значення цієї радіальної складової за колом посередині повітряного проміжку визначається за виразом $\dot{B}_r(x, y) = cx \cdot \dot{B}_x(x, y) + sx \cdot \dot{B}_y(x, y) = B_r(x, y) e^{j\beta(x, y)}$, де $cx = x/\sqrt{x^2 + y^2}$, $sx = y/\sqrt{x^2 + y^2}$ – косинус та синус кутової координати поточної точки за колом посередині повітряного проміжку, яка має координати x, y ; $\dot{B}_x(x, y), \dot{B}_y(x, y)$ – x, y - складові часових комплексів проек-

цій вектора індукції за польовим аналізом; $B_r(x, y), \beta(x, y)$ – модуль та аргумент комплексу радіальної індукції у точці з координатами x, y . Миттєве значення радіальної складової вектора індукції у точці за обраним колом визначається виразом

$$b_r(x, y) = B_r(x, y) \cos[\omega_0 t + \beta(x, y)]. \quad (1)$$

Для фіксованої величини часу t вираз (1) дає змогу побудувати залежність зміни радіальної індукції вздовж повітряного проміжку у тангенціальному напрямку. Гармонічний аналіз цієї залежності задіяний для відокремлення основного потоку від потоку зігзагрозіювання. За застосування розкладу до ряду Фур'є у комплексній формі просторову гармонічну складову індукції із порядком ν представлено у вигляді суми двох сполучених комплексів, що зустрічно обертаються:

$$\bar{B}_{r\nu} = 0,5(a_\nu - jb_\nu) e^{j\frac{\nu y}{|y|} \arccos cx} + 0,5(a_\nu + jb_\nu) e^{-j\frac{\nu y}{|y|} \arccos cx},$$

$$\text{де } a_\nu = \frac{\int_l b_r(x, y) \cos\left(\frac{\nu y}{|y|} \arccos cx\right) dl}{\pi(R - \delta/2)}; \quad b_\nu = \frac{\int_l b_r(x, y) \sin\left(\frac{\nu y}{|y|} \arccos cx\right) dl}{\pi(R - \delta/2)} \quad \text{є константами ряду;}$$

величина l вказує на інтегрування за колом із радіусом $R = \delta/2$.

З урахуванням цього максимум модуля результуючого комплексу у два рази більший, ніж модулі сполучених комплексів і є максимумом просторової гармоніки індукції із порядком ν :

$$B_{m\nu} = \frac{\sqrt{\left[\int_l b_r(x, y) \cos\left(\frac{\nu y}{|y|} \arccos cx\right) dl \right]^2 + \left[\int_l b_r(x, y) \sin\left(\frac{\nu y}{|y|} \arccos cx\right) dl \right]^2}}{\pi(R - \delta/2)}. \quad (2)$$

Для зубчастих структур статора і ротора запропоновано вираз визначення максимуму просторової гармоніки індукції із порядком ν з урахуванням зміни магнітного опору повітряного проміжку під час обертання поля. Зміна величини часу t у виразі (1) забезпечує зміну просторової орієнтації максимуму індукції і можливість її усереднення протягом часового періоду з урахуванням (1), (2) для уточненого визначення індукції:

$$B_{m\nu} = \frac{1}{\pi N \left(R - \frac{\delta}{2}\right)} \sum_{i=1}^N \sqrt{\left(\int_l B_r(x, y) \cos\left[\frac{i\pi}{N} + \beta(x, y)\right] \cos\left(\frac{\nu y}{|y|} \arccos cx\right) dl \right)^2 + \left(\int_l B_r(x, y) \cos\left[\frac{i\pi}{N} + \beta(x, y)\right] \sin\left(\frac{\nu y}{|y|} \arccos cx\right) dl \right)^2},$$

де N – кількість моментів часу протягом часового періоду. Для врахування впливу зміни взаємного положення осердь статора і ротора подібне усереднення здійснюється за серією польових розрахунків за варіювання куту повороту ротора. Для робочої гармоніки, коли її порядок дорівнює кількості пар полюсів p , за величиною максимуму просторової гармоніки індукції з порядком $\nu = p$, визначається величина основного потоку машини:

$$\Phi_m = 2B_{r\nu(\nu=p)} l_\delta (R - \delta/2) / p.$$

Для однозначного визначення параметрів заступної схеми АД за результатами польового аналізу, крім інформації про величину основного магнітного потоку, залучено ще одну додаткову умову еквівалентування, наприклад, за заданим розподілом потоку розсіювання між статором і ротором.

Таким чином, розроблено методологію і вирази для безпосереднього визначення величини основного магнітного потоку АД за результатами польового аналізу, які завдяки розподілу потоку повітряного проміжку на основний і зігзагрозіювання забезпечують підвищення точності визначення параметрів заступної схеми і адекватності математичної моделі.

Трифазно-однофазні електроприводи з АД механізмів із стохастичними навантаженнями. Режими роботи багатьох електроприводів, що використовуються в механізмах будівельного, сільськогосподарського виробництв та комунального господарства, характеризуються випадковою зміною моменту навантаження в широкому діапазоні [15, 16]. Це стосується і електроприводів на базі трифазного АД, що живляться від однофазної мережі – трифазно-однофазних електроприводів з регульованими фазозміщувачами. Інтенсивний стохастичний характер зміни збурень таких механізмів (дробарок, будівельно-оздоблювальних машин) суттєво погіршує показники роботи їх електроприводів: вимагає завищення встановленої потужності електродвигуна, викликає удари в механічних частинах, кидки струму в двигуні та в мережі, що знижує якість споживаної енергії та збільшує втрати потужності. Підвищити ефективність та надійність їх роботи можливо шляхом збільшення переважувальної здатності електроприводу в динамічних режимах для подолання викидів випадкових збурень.

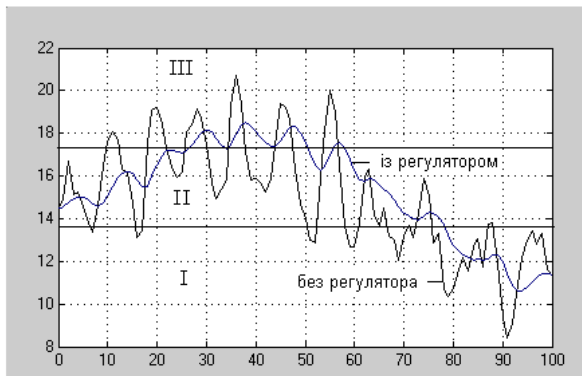
Запропоновано спосіб подолання викидів стохастичного моменту навантаження у трифазно-однофазних асинхронних електроприводах за рахунок застосування дискретно регульованого фазозміщувача з статистично оптимальним фільтром. У [18] запропонована схема трифазно-однофазного електроприводу з триелементним фазозміщувачем з дискретним триступеневим регулюванням ємностей конденсаторів. Регульованим параметром у цій схемі є коефіцієнт несиметрії, який визначається непрямо через момент навантаження, що в свою чергу контролюється за допомогою датчиків електричних величин – фазних напруг та струмів. Запропонована замкнута система керування може забезпечити симетричний режим роботи асинхронного двигуна в широкому діапазоні зміни навантаження і відповідно знизити його енергоспоживання. Для врахування стохастичного характеру зміни навантаження система керування має бути доповнена фільтром випадкової величини, який може бути поданий як статистично оптимальний регулятор, синтез якого відбувається за критерієм мінімуму середньоквадратичної похибки регульованого параметра – у цьому випадку коефіцієнта несиметрії.

Розвинута методика проектування статистично оптимальних регуляторів для дискретно регульованих систем електроприводу на основі сучасних методів варіаційного числення [17]. За цією методикою проведено синтез статистично оптимального регулятора електроприводу прямої дробарки зерна, виконаного за запропонованою схемою.

Часові діаграми зміни електромагнітного моменту трифазно-однофазного електроприводу за випадкового моменту навантаження з експоненціально-косинусною кореляційною функцією за застосування статистично оптимального регулятора та без нього показані на рисунку.

Кожен ступінь регулювання цього фазозміщувача відповідає визначеному діапазону зміни навантаження. Цифрами I, II, III показано зони, в яких відбувається робота з одним із трьох ступенів фазозміщувача. Суцільними лініями між цими зонами показані лінії перемикання ступенів. Зазначимо, що за застосування оптимального фільтра перемикання між ступенями відбувається значно рідше, ніж при відсутності фільтра.

$M, H \cdot m$



t, c

Проведені дослідження показали ефективність фільтрації статистично оптимальними регуляторами високочастотних складових моменту навантаження з відповідним зниженням дисперсії електромагнітного моменту в 4-5 разів. Завдяки цьому є можливими суттєве зниження амплітуди пульсацій електромагнітного моменту та відповідних навантажень на механічні вузли, зменшення кількості перемикань комутатора конденсаторів, що збільшує у цілому надійність запропонованої системи, та збіль-

шення енергетичних показників електроприводу.

Розвинуто підхід до проектування статично оптимальних регуляторів для дискретно регульованих систем електроприводу на основі сучасних методів варіаційного числення, які дають змогу визначити оптимальні закони керування в умовах обмеження кількості та рівнів керуючих впливів.

Вентильно-індукторні двигуни. Застосування регульованого приводу (асинхронного і вентильно-індукторного) для тих установок, які донедавна використовували нерегульований привод, забезпечує їх високу економічну ефективність, завдяки чому досягається економія електроенергії. Це стосується, насамперед, насосних агрегатів, вентиляторного устаткування, компресорів, для яких необхідне регулювання частоти обертання двигуна в межах 1:2 (насоси, вентилятори), 1:5 (компресори). Проведено розрахункові дослідження та аналіз динамічних режимів вентильно-індукторного двигуна з врахуванням нелінійного періодичного навантаження [1], а також експериментальні дослідження, у результаті яких визначено механічні й енергетичні характеристики двигуна за різних напруг живлення ланки постійного струму, і розроблено рекомендації щодо його використання для устаткування з регулюванням частоти обертання в межах 1:5, у тому числі поршневих компресорів [9].

Проведено аналіз основних типів електроприводів насосних і вентиляторних установок, які використовуються в комунальному господарстві, і одержано їх порівняльні характеристики. Виконано аналіз і дослідження добового графіка завантаження насосних агрегатів. Розроблено рекомендації щодо покращення ККД, коефіцієнта потужності зазначених електроприводів. Відповідно до заданої потужності насосних агрегатів запропоновано конфігурації магнітної системи вентильно-індукторного двигуна.

Електричні машини з постійними магнітами. Однією з характерних особливостей електричних машин з постійними магнітами є різноманітність їх конструкційних виконань. Такі електричні машини повинні проектуватися з урахуванням сфери їх використання та характеру навантаження на валу. Під час розробки і проектування необхідно враховувати специфічність протікання електромагнітних процесів у кожній з конструкцій.

Тому вирішено було такі задачі [2, 3, 4, 6, 10, 19–21]:

- розроблено аналітичний метод розрахунку магнітного поля в активному об'ємі безпазових магнітоелектричних машин з дисковою, циліндричною та лінійною конфігураціями магнітних систем за довільного набору елементів будь-якого типу (обмотка зі струмом, постійний магніт, магнітопровід);

- розроблено підходи до визначення оптимальної геометрії магнітної системи безпазових електричних машин для реалізації заданої цільової функції: мінімуму маси рухомого елемента, мінімуму вартості електричних машин, максимуму електромагнітного моменту;

- розроблено математичні моделі електричних машин із зубцево-пазовим та явнополюсним статором на основі постійних магнітів та феромагнітних концентраторів магнітних потоків, що забезпечують значне підвищення щільності магнітної енергії в сфері енергоперетворення;

- створено алгоритми та програмне забезпечення для дослідження, аналізу та синтезу електричних машин з заданими функціональними властивостями;

- проведено експериментальне дослідження на фізичних моделях електричних машин з постійними магнітами та порівняно розрахункові й експериментальні залежності.

Аналітичний метод розрахунку магнітного поля у безпазових електричних машинах з постійними магнітами базується на розв'язку рівнянь магнітостатики в області полюсного поділу електричної машини з граничними умовами симетрії поля між сусідніми полюсами і граничними умовами Діріхле на інших границях. Рішення представляється у вигляді ряду Фур'є відносно осі, вздовж якої спостерігається симетрія поля. Аналітичний метод, у кінцевому підсумку, зводиться до розв'язання системи лінійних рівнянь нескінченного ряду (для заданої точності можна обмежитися кінцевим числом рівнянь ряду). Головною відмінністю цього методу від інших є можливість моделювання області полюсного поділу електричної машини, яка може містити довільний набір конструкційних елементів будь-

якого типу (обмотка зі струмом, постійний магніт, магнітопровід), ширина яких збігається з шириною полюса. Метод може застосовуватися як для прямокутної області в декартовій системі координат, так і для сектора в циліндричній системі координат [3].

На основі аналітичного методу розроблено процедуру оптимального проектування безпазових електричних машин і проведено оптимізаційні розрахунки з метою визначення оптимальної геометрії магнітної системи електричних машин з постійними магнітами лінійного, дискового або циліндричного типів у такій постановці: обмеження – габарити або маса електричної машини; варійовані параметри – геометрія магнітної системи; цільова функція – мінімальна вартість електричної машини або мінімальна маса рухомої частини, або максимальний електромагнітний момент.

Порівняння результатів розрахунку, отриманих аналітичним методом та в програмних комплексах COMSOL 3.4 і ELCUT 5.6, показало, що середнє відхилення для індукції не перевищує 2 %, а для зусилля або електромагнітного моменту – 3 %.

Проведено порівняльний аналіз двох модифікацій генераторів для вітроустановок з явнополюсним статором з радіальним і тангенціальним намагнічуванням постійних магнітів на роторі і встановлено, що генератор з тангенціальним намагнічуванням магнітів при ідентичних габаритних розмірах статора має більші енергетичні показники. Для двох модифікацій електрогенераторів проведено оптимізаційні розрахунки за варіації зовнішнього радіуса ротора, товщини полюсних наконечників статора і розмірів постійних магнітів і отримано оптимальні розміри магнітної системи для заданої потужності електрогенератора [2, 19].

Розглянуто комплексний підхід до проектування електродвигуна дискового типу з постійними магнітами на роторі для використання як привод крила літака. Підхід включає вибір числа полюсів, попередню оптимізацію магнітної системи з метою отримання максимального статичного обертового моменту за заданих зовнішніх габаритів електричної машини, а також розрахунок режиму двигуна в динаміці з використанням пакета Matlab Simulink та побудову характеристик електродвигуна [4].

На основі теоретичних і експериментальних досліджень розроблено і виготовлено новий привод регулятора напруги під навантаженням (РПН) силових трансформаторів. Замість асинхронного електродвигуна в приводі РПН застосований електродвигун з постійними магнітами, вал якого безпосередньо (без редуктора) з'єднаний з валом РПН. Реалізовано можливість дистанційного контролю стану виконання перемикачів РПН за положенням, швидкістю, часом, струмом, напругою. За величиною струму, що споживається електродвигуном, можна здійснювати моніторинг стану перемикача.

Вдосконалено математичні моделі електричних машин із зубцево-пазовим статором на основі постійних магнітів і феромагнітних концентраторів магнітного потоку, що на відміну від відомих враховують геометричні особливості їх магнітопроводів.

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 два патенти на винахід.

У 2014 році планується провести дослідження робочих характеристик АГ з ВЗ в автономній енергосистемі, якості її енергії в статичних і динамічних режимах та оцінити стійкість системи, виготовити дослідні зразки електричних машин з постійними магнітами і провести їх експериментальні дослідження, вдосконалити математичні моделі насосної установки з вентиляно-індукторним приводом, розробити уточнені математичні моделі для дослідження режимів роботи АД систем з напівпровідниковими перетворювачами та вдосконалити закони регулювання асинхронними електроприводами із стохастичним та періодичним навантаженням.

1. Бибик Е.В. Анализ режимов вентиляно-индукторного двигателя поршневого компрессора // Мат. XII Міжнар. наук.-техн. конф. "Проблеми підвищення ефективності електромеханічних перетворювачів в

- електроенергетичних системах" (Севастополь 23–27 вересня 2013). – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2013. – С. 35–36.
2. *Гребеников В.В.* Сравнительный анализ конструктивных модификаций электрогенератора малой мощности с постоянными магнитами и явнополюсным статором // Техн. електродинаміка. – 2013. – № 22. – С. 64–68.
 3. *Гребеников В.В., Гамалея Р.В., Гамалея Р.Р.* Особенности математического моделирования магнитостатического поля в электрических машинах с постоянными магнитами // Проблемы повышения эффективности электромеханических преобразователей в электроэнергетических системах: Мат. Междунар. науч.-техн. конф. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2013. – С. 203–205.
 4. *Гребеников В.В., Гамалея Р.Р., Шарaban Ю.В.* Проектирование дискового электродвигателя с постоянными магнитами для комбинированного привода механизации крыла самолета АН-178 // Проблемы повышения эффективности электромеханических преобразователей в электроэнергетических системах: Мат. Междунар. науч.-техн. конф. – Севастополь: Изд-во СевНТУ. – 2013. – С. 23–25.
 5. *Джура О.В.* Гідродизельна автономна енергосистема з асинхронними генераторами // Гідроенергетика України. – 2013. – № 3-4. – С. 40–46.
 6. *Козырський В.В., Трегуб Н.И., Гребеников В.В., Приймак М.В.* Обоснование методов уравнивания магнитного момента дугостаторного ветроэлектрического генератора с кольцеобразным ротором // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАН України, 2013. – Вип. 36. – С. 64–71.
 7. *Мазуренко Л.І., Джура О.В., Диннік Л.М.* Асинхронні генератори піко- і мікроГЕС // Гідроенергетика України. – 2013. – № 1. – С. 45–47.
 8. *Мазуренко Л.І., Джура О.В., Диннік Л.М., Білик О.А.* Математична модель асинхронних генераторів з вентильним збудженням автономної енергосистеми постійного струму // Електромеханічні і енергозберігаючі системи: Щоквартальний науково-виробничий журнал. – Кременчук: КрНУ, 2013. – Вип. № 2/2013 (22). – Ч. 2. – С. 321–326.
 9. *Мазуренко Л.І., Бібик О.В., Білик О.А., Жуков Л.О.* Технічна реалізація та експериментальні дослідження вентильно-індукторного двигуна // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Щоквартальний науково-виробничий журнал. – Кременчук: КрНУ, 2013. – Вип. № 2/2013 (22). – Ч. 2. – С. 158–161.
 10. *Мазуренко Л.І., Джура О.В., Попович В.І., Гребеников В.В., Бібик О.В., Головань І.В., Шуруб Ю.В., Вербовий А.П., Романенко В.І.* Електричні генератори і двигуни змінного струму. Електромеханотронні перетворювачі енергії // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАН України, 2013. – Вип. № 35. – С. 58–67.
 11. *Мазуренко Л.І., Джура А.В., Романенко В.І.* Автономные энергосистемы с асинхронными генераторами с вентильным возбуждением // Мат. XII Міжнар. наук.-техн. конф. "Проблеми підвищення ефективності електромеханічних перетворювачів в електроенергетичних системах" (Севастополь, 23–27 вересня 2013 р.). — Севастополь: Изд-во СевНТУ. – 2013. – С. 180–182.
 12. *Мазуренко Л.І., Джура О.В., Романенко В.І., Шевчук Н.І.* Алгоритм розподілу потужності в автономній енергосистемі з асинхронними вентильними генераторами // Вісн. Нац. техн. ун-ту "Харківський політехнічний інститут". Серія "Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика". (Темат. вип.). – Харків: НТУ "ХПІ". – 2013. – № 36 (1009). – С. 376–377.
 13. *Попович О.М., Головань І.В.* Визначення параметрів заступної схеми асинхронного двигуна та їх нелінійних залежностей за результатами польового аналізу // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАН України, 2012. – Вип. 31. – С. 38–48.
 14. *Попович О.М., Головань І.В.* Підвищення адекватності математичних моделей асинхронного електроприводу // Вісн. Нац. техн. ун-ту «ХПІ»: Зб. наук. пр. Серія: Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика. – Х.: НТУ «ХПІ». – 2013. – № 36(1009). – С. 64–65.
 15. *Шуруб Ю.В.* Класифікація та моделювання випадкових навантажень електроприводів // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Серія "Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика". (Темат. вип.). – Харків: НТУ "ХПІ". – 2013. – № 36 (1009). – С. 244–245.
 16. *Шуруб Ю.В.* Математична модель регульованого за напругою асинхронного двигуна для статистично оптимального синтезу замкнутих систем електроприводу // Наук. вісн. Нац. ун-ту біоресурсів і природокористування України. – 2013. – Вип. 184. Ч. 2. – С. 189–192.
 17. *Шуруб Ю.В.* Методика синтезу статистично оптимальних систем асинхронних електроприводів // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – 2013. – Вип. 2/2013 (22). – С. 17–23.
 18. *Шуруб Ю.В.* Шляхи підвищення ефективності роботи асинхронних електроприводів із випадковими навантаженнями // Проблеми та перспективи розвитку енергетики, електротехнологій та автоматики в АПК: Міжнар. наук.-практ. конф. до 115-річчя заснування Національного університету біоресурсів та природокористування України, 5-6 листопада 2013 р., Київ, Україна. – К.: ЦП «Компринт». – 2013. – С. 56–57.
 19. *Szymczak Piotr, Grebenikov Viktor, Pryjmak Maksim* // Przegląd elektrycznych silników samocodowych // Wiadomości elektrotechniczne. – 2013. – № 08. – С. 28–33.
 20. *Пат. на корисну модель UA 79084. МПК H02K21/12, H02K21/24.* Аксиальний магніто-електричний генератор / М.І. Трегуб, В.В. Козирський, В.В. Гребешков, М.В. Приймак // Промислова власність. – 2013. – № 7.

21. Пат. UA 101885. МПК H02K21/14. Електрична машина з постійними магнітами / В.А. Барабаш, М.В. Богаченко, В.В. Гребеніков, В.С. Попков, М.В. Приймак // Промислова власність. – 2013. – № 9.

УДК 621.313

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

Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Київ-57, 03680, Украина

Развитие теории, усовершенствование математических моделей, исследование электрических машин и электромеханических систем

Приведены основные научные и практические результаты отдела электромеханических систем Института электродинамики НАН Украины за 2013 год, связанные с параллельной работой асинхронных генераторов с вентильным возбуждением в составе автономных энергосистем, усовершенствованием математических моделей, методов анализа процессов, методик проектирования и исследованием электромеханических систем на основе асинхронных и вентильно-индукторных машин, электрических машин с постоянными магнитами. Библ. 21, рисунок.

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

L.I. Mazurenko, V.V. Grebenikov, O.V. Dzhura, O.M. Popovych, O.V. Bibik, I.V. Holovan, Yu.V. Shurub, V.I. Romanenko

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

Theory development, improvement of mathematical models, investigation of electric machines and electromechanical systems

The basic scientific and practical results of the department of electromechanical systems of Institute of electrodynamics NASU for the 2013 year related to parallel operation of induction generators with electronic excitation systems in autonomous power systems, improvement of mathematical models, methods for processes analysis, methods of development and investigation of electromechanical systems with induction motors and switched reluctance motors, electric machines with permanent magnets are presented. References 21, figure.

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

Надійшла 3.04.2014

Received 3.04.2014