

## **№ 6. ВІДДІЛ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ**

УДК 621.313

**Л.І. Мазуренко, О.М. Попович, В.В. Гребеніков,  
О.В. Бібік, І.В. Головань, О.В. Джура,  
Ю.В. Шуруб, А.П. Вербовий, В.І. Романенко**

### **ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ ЗМІННОГО СТРУМУ ТА МАШИННО-ВЕНТИЛЬНІ КОМПЛЕКСИ НА ЇХ ОСНОВІ**

*Наведено основні наукові результати відділу електромеханічних систем за 2009 рік, пов'язані з розробкою математичних моделей, експериментальними та розрахунковими дослідженнями асинхронних генераторів і двигунів, машинно-вентильних комплексів на їх основі та електричних машин з постійними магнітами.*

*Приведены основные научные результаты отдела электромеханических систем за 2009 год, связанные с разработкой математических моделей, экспериментальными и расчетными исследованиями асинхронных генераторов и двигателей, машинно-вентильных комплексов на их основе и электрических машин с постоянными магнитами.*

Роботи 2009 року були спрямовані на вирішення таких наукових задач: підвищення енергоефективності автономних енергоустановок загальнопромислового і спеціального призначення за рахунок використання нових типів генераторів та генеруючих машинно-вентильних комплексів; дослідження та створення нових моделей і алгоритмів розрахунку процесів енерго- та ресурсозберігаючих електромеханічних систем на базі асинхронних двигунів, спроектованих з урахуванням особливостей навантаження; розробка науково-технічних засад нових технологій електричних машин з підвищеними енергетичними показниками на основі сучасних магнітних та ізоляційних матеріалів; дослідження та розробка принципів побудови, математичних моделей і методів розрахунку процесів електромеханотронних перетворювачів енергії для застосування в енергетиці, автоматичній, комунальному господарстві та техніці спеціального призначення.

**Асинхронні генератори.** Математичні моделі асинхронних генераторів та машинно-вентильних комплексів на їх основі. В математичних моделях для дослідження електромагнітних процесів в асинхронних генераторах з вентильним збудженням (АГ з ВЗ) окремими блоками моделюються асинхронна машина і вентильний перетворювач. При цьому використовується модель генератора і перетворювача системи збудження в неперетворених координатах статора або електричної машини в перетворених, а перетворювача в неперетворених координатах. Стан напівпровідникових елементів перетворювача визначається на кожному кроці інтегрування систем диференціальних рівнянь (ДР). Тому головні недоліки цих моделей – значний час, необхідний для обчислень, і складність визначення стану напівпровідникових елементів. Ці недоліки відсутні в розробленій моделі з використанням методу припасавання. У цьому випадку немає необхідності визначати стан напівпровідникових елементів на кожному кроці інтегрування системи ДР. Це пояснюється тим, що робота АГ з перетворювачем представляється послідовністю миттєвих схем заміщення, тривалість існування яких залежить від частоти керуючих імпульсів. Як при навантаженні змінного, так і постійного струму при алгоритмах однократного перемикавання вентилів існує шість миттєвих схем. Одержано ДР в матричній формі, що описують послідовність миттєвих схем. Їх основою є запропонована матриця стану системи, що включає елементи, які не змінюються для всіх схем заміщення, а також елементи, що змінюються для кожної із схем заміщення.

Розроблена модель може бути використана для розрахунку електромагнітних процесів в АГ з ВЗ як з частотним, так і фазовим принципом керування. Розрахункові криві струмів і напруг показують якісне і кількісне співпадання з результатами, одержаними за допомогою моделі, в якій стан напівпровідникових елементів визначається на кожному кроці інтегрування системи ДР. Максимальне відхилення від експериментальних даних становить близько 10 %.

Одним з режимів роботи автономних АГ, що часто зустрічається, є режим роботи на випрямляч з *RC*-навантаженням (високочастотний інвертор, широтно-імпульсний регулятор тощо). Тому актуальною є задача створення математичних моделей багатообмоткових АГ з ємнісним збудженням, що живлять через випрямляч споживачів постійного струму.

Розроблено математичні моделі АГ з короткозамкненим ротором і двома статорними обмотками при їх різних з'єднаннях: з електричним зв'язком між статорними обмотками і при його відсутності. Математичні моделі базуються на запропонованих рівняннях електричної машини, що мають нову форму запису, а також рівняннях, які забезпечують зв'язок між окремими структурними елементами АГ з випрямлячем.

Розроблені моделі дають змогу досліджувати динамічні та квазісталі режими АГ. Проведені дослідження показали адекватність розрахункових та експериментальних результатів.

Розроблено математичну модель однопостового автономного зварювального комплексу. Вона включає моделі наступних структурних елементів: асинхронна машина (АМ) з системою збудження; трифазний мостовий випрямляч, інвертор, трансформатор, вихідний випрямляч з навантаженням [7].

Порівняння моделей з аналогічними моделями бібліотеки SimPowerSystems (SPS) пакета MATLAB дозволяє зробити висновки:

1. Модель АМ в неперетвореній системі координат більш доцільна у порівнянні з SPS-моделлю АМ у перетвореній системі координат  $d$ - $q$ . Остання малоадекватна в несиметричних режимах роботи.

2. Запропоновані моделі випрямлячів і трансформатора при постійних параметрах схеми заміщення забезпечують практично аналогічні SPS-моделям якісні і кількісні показники розрахункових величин з дещо меншими затратами часу.

3. Розглянута модель інвертора більш ідеалізована у порівнянні з моделями інвертора на основі SPS-моделей IGBT і MOSFET транзисторів, що обумовлює значну різницю у часі розрахунку. На високих частотах перемикання, а також при малій напрузі генератора, коли втратами в інверторі неможливо нехтувати, треба надавати перевагу SPS-моделям.

4. Моделювання навантаження з використанням запропонованої моделі надає більші можливості при дослідженні АГ, ніж у випадку використання моделей навантаження SimPowerSystems (SPS). Це пов'язано з тим, що параметри моделей навантаження, які існують в ній, у процесі моделювання заблоковані для змін.

Проводилась робота по вдосконаленню математичних моделей допоміжних генераторів зварювальних комплексів. Деякі їх схеми наведено в роботах [6, 8].

Дослідження АГ та машинно-вентильних комплексів на їх основі. Проведено розрахункові та експериментальні дослідження АГ з ємнісним збудженням та двома обмотками статора при різних їх з'єднаннях ( $Y/\Delta$ ,  $Y/Y$  тощо) при роботі на випрямляч з *RC*-навантаженням. Одержано залежності фазних струмів і напруг обмоток, випрямленої напруги в функції провідності навантаження. Порівняння експериментальних характеристик АГ, виконаних по схемах  $Y/\Delta$  і  $Y/Y$ , показало, що схема  $Y/Y$  забезпечує не тільки більшу стабільність вихідної напруги, але і більшу (на 34 %) вихідну потужність АГ. Встановлено, що жорсткість зовнішньої характеристики АГ і максимальна потужність обмотки з випрямлячем залежать від її вихідної напруги і не залежать від схеми включення ( $\Delta$  або  $Y$ ). При цьому величина ємності конденсаторів у ланцюзі постійного струму випрямляча не впливає на жорсткість зовнішньої характеристики.

Досліджено однопостовий автономний зварювальний комплекс, який включає АГ з ємнісним збудженням, що працює на ланцюг трифазний випрямляч – високочастотний інвертор – трансформатор – однофазний випрямляч [5]. Це дало змогу розробити алгоритм ке-

рування постовим інверторним регулятором струму автономного зварювального комплексу і одержати комплексне рішення для виключення явища накопичування постійної складової в струмі первинної обмотки високочастотного трансформатора.

Проведені дослідження автономних зварювальних комплексів дозволили запропонувати спосіб керування автономним АГ з короткозамкненим ротором, що збуджується від вентильного перетворювача, при якому зовнішні зварювальні характеристики формують зміною частоти цього перетворювача. В процесі їх формування в якості регульованої величини вибирається як напруга, так і струм.

**Асинхронні двигуни.** Алгоритм розрахунку параметрів заступної схеми асинхронного двигуна за даними моделювання електромеханічного перетворювача методом кінцевих елементів. Традиційно асинхронний двигун (АД) розглядається як система магнітозв'язаних обмоток, параметри яких представляють собою активні опори та індуктивності, і процеси в електричній машині аналізуються за допомогою рівнянь електричної і механічної рівноваги. При цьому відповідно до заступної схеми індуктивності поділяються на індуктивності за основним потоком взаємодукції і за потоком розсіювання, а активні опори розраховуються з врахуванням витіснення струму. Таке представлення спрощує визначення параметрів рівнянь електричної рівноваги. Проблема визначення параметрів заступної схеми є важливою проблемою теорії електричних машин: особливо при розробці та дослідженні спеціалізованих асинхронних машин та машин традиційної конструкції в спеціальних режимах.

У даний час завдяки стрімкому розвитку обчислювальної техніки, програмного забезпечення, чисельних методів розрахунку поля з'явилась можливість широкого використання польових математичних моделей електричних машин для отримання параметрів рівнянь електричної рівноваги.

Таке визначення параметрів рівнянь електричної рівноваги, при умові коректної обробки результатів розрахунку електромагнітного поля машини, дає змогу забезпечити необхідну достовірність розрахунків спеціальних режимів роботи серійних АД та при створенні нових і удосконаленні існуючих їх конструкцій. Складність такого підходу пов'язана з необхідністю розподіляти потік машини на основний потік та потік розсіювання.

Розроблений алгоритм розрахунку параметрів рівняння електричної рівноваги за результатами чисельного розрахунку електромагнітного поля електричної машини дає змогу на основі інформації про струм еквівалентних контурів ротора, струм фази статора, магніторушійні сили статора і ротора, а також електромагнітний момент розділити потік машини на основний та потік розсіювання. Після цього отримується значення реактивної потужності, що споживається АД, та реактивної потужності, яка витрачається на створення основного магнітного поля машини.

Виходячи з балансу реактивних потужностей електричної машини здійснюється розрахунок сумарної реактивної потужності, що витрачається на створення полів розсіювання статора та ротора. Потім проводиться розділення реактивної потужності статора та ротора на складові: по шляхах пазового розсіювання та коронок зубців протилежного контура.

Отриманий таким чином алгоритм розрахунку індуктивностей за основним потоком взаємної індуктивності статор-ротор та індуктивностей за шляхами розсіювання статора та ротора дає змогу визначити залежності даних параметрів у функції магніторушійної сили та ковзання машини.

Дані залежності в подальшому використовуються як вхідні параметри математичної моделі електричної машини при дослідженні її квазістатичних та динамічних режимів роботи.

Математична модель асинхронної машини електромеханотронної системи для імітаційного та структурного моделювання. Розроблено математичну модель АД і програму дослідження режимів його роботи в системі імітаційного та структурного моделювання MATLAB-Simulink при врахуванні довільної структури віток обмотки статора, схеми з'єднання їх між собою та із елементами зовнішньої мережі, в тому числі при довільному підключенні напівпровідникових пристроїв у зовнішній мережі та між вітками.

Дана математична модель враховує такі особливості режимів та конструкцій, що мо-

жуть суттєво впливати на характеристики машини: несинусоїдність та несиметрію живлення, несиметрію параметрів АД за фазами, несинусоїдність розподілу магніторушійних сил (МРС) у повітряному проміжку, взаємну індуктивність фаз за шляхами розсіювання, складну структуру обмотки статора та з'єднання із зовнішніми елементами, практично відсутність сталих режимів (превалюють динамічні або квазісталі режими).

Ефективним сучасним засобом моделювання складних електромеханічних систем є система імітаційного та структурного моделювання MATLAB-Simulink. Стандартні блоки АД бібліотек блоків імітаційного моделювання SimPowerSystems, Simscape побудовано на математичній моделі для схеми з'єднання фаз статора – «зірка» при симетрії параметрів і врахуванні однієї просторової гармоніки МРС, що може не забезпечувати необхідної адекватності математичних моделей АД при дослідженні їх у складі електромеханотронної системи (ЕМТС). Для оформлення розробленої математичної моделі у вигляді блока у підсистемі Simulink і ув'язки його з блоками імітаційного моделювання SimPowerSystems рівняння трансформовано до форми, яка обумовлена особливостями структурного моделювання і зв'язками між блоками імітаційного та структурного моделювання Simulink і SimPowerSystems.

Рівняння математичної моделі АД дають змогу визначити часові залежності струмів контурів симетричного короткозамкненого ротора і віток статора АД при довільній їх кількості і параметрах, якщо відомі часові залежності швидкості ротора і напруг, які прикладені до даних віток. Величини параметрів у рівняннях електричної рівноваги при врахуванні спектра гармонік МРС визначаються при визначених величинах одиничних МРС віток за гармоніками МРС та при врахуванні параметрів заступної схеми.

Рівняння електричної рівноваги в матричній формі при врахуванні схеми з'єднання віток між собою і з мережею записано стосовно незалежних струмів віток статора і просторових комплексів струмів ротора за гармоніками МРС порядків  $v$ :

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} [i_{sn}] &= [(k_u [M_{ss} [k_{inv}]]_l)^{-1} \times \\ &\times [u_c] - [k_u] [r_s [k_{inv} [i_{sn}]] + \operatorname{Re} \left( \left[ \bar{M}_{sr}^* \right] \frac{d}{dt} [\bar{i}_r] \right)] - (k_u [M_{ss} [k_{inv}]]_m \frac{d}{dt} [i_{sn}]]; \\ \frac{d}{dt} [\bar{i}_r] &= [[l_r] + [M_{rr}]]^{-1} \left[ j\omega_r [v] \left( [l_r] + [M_{rr}] \right) [\bar{i}_r] + \frac{z_2}{2} [\bar{M}_{sr}] [i_s] \right] - [r_r] [\bar{i}_r] - \frac{z_2}{2} [\bar{M}_{sr}] \frac{d}{dt} [i_s], \end{aligned}$$

де крім матриць параметрів присутні такі матриці:  $[u_c]$  – матриця-стовпець відомих напруг мережі;  $[k_u]$  – матриця визначення відомих напруг мережі через напруги віток за другим законом Кірхгофа;  $[k_{inv}]$  – матриця перетворення незалежних струмів у струми віток за першим законом Кірхгофа; індекси  $l$  та  $m$  позначають власну і взаємну частини повної матриці індуктивності. Тобто до квадратної матриці власної індуктивності  $([k_u [M_{ss} [k_{inv}]]_l)$  входять елементи матриці  $[k_u [M_{ss} [k_{inv}]]$ , у яких номери рядків і стовпців співпадають ( $i=q$ ), до взаємної,  $([k_u [M_{ss} [k_{inv}]]_m)$  – не співпадають ( $i \neq q$ ).

Розроблені математична модель та програма використовуються при дослідженні та формуванні енергоефективних режимів роботи ЕМТС з АД, конструкції яких інтегровано до ЕМТС, або при особливостях підключення фаз двигуна до мережі. При цьому розширюється коло чинників, що змінюються, і підвищується ефективність пошуку оптимальних рішень.

Моделювання та вибір параметрів асинхронних електроприводів із випадковим навантаженням. Асинхронний електропривод значної частини механізмів сільськогосподарського та комунального призначення має навантаження, що змінюється за випадковим законом. У багатьох випадках живлення трифазних двигунів відбувається від однофазної мережі, а в якості фазозміщуючих елементів використовуються конденсатори з постійною чи регульованою ємністю. Відзначимо, що якість напруги мережі живлення часто не відповідає нормі, і коливання напруги в загальному випадку також має стохастичний характер. При випадково-

му характері змін навантаження електродвигуна і напруги живлення вибір параметрів фазозсуваючих елементів є складною задачею, і його доцільно проводити з урахуванням ймовірнісних характеристик збурень електропривода.

Вибір параметрів фазозсуваючих елементів базується на мінімізації дисперсії струму зворотної послідовності. Якщо зміна навантаження характеризується як випадковий стаціонарний процес, то процес зміни величин симетричних складових також можна описати стаціонарними випадковими функціями. Таким чином, задача зводиться до визначення чисельних характеристик випадкових величин, що мають функціональну залежність від іншої випадкової величини.

При незмінній нарузі мережі живлення і постійних параметрах фазозсуваючих елементів величини струмів і напруг прямої і зворотної послідовностей визначаються однозначно через параметри двигуна при симетричному живленні. Знаючи закон розподілення випадкової величини – лінійного струму  $I(t)$ , можливо визначити числові характеристики випадкових величин – струмів прямої і зворотної послідовностей  $I_1 = \varphi_1(I)$ ,  $I_2 = \varphi_2(I)$ . Так, математичне сподівання і дисперсія струму прямої послідовності визначаються виразами

$$m_{I_1} = \int_{-\infty}^{\infty} \varphi_1(I) f(I) dI; \quad \sigma_{I_1}^2 = \int_{-\infty}^{\infty} [\varphi_1(I) - m_{I_1}]^2 f(I) dI, \text{ де } f(I) \text{ – густина розподілення ймовірності лінійного струму } I(t).$$

Якщо функція  $I_1 = \varphi_1(I)$  достатньо близька до лінійної в області практично можливих значень випадкових навантажень, то наближені значення оцінок математичного сподівання і дисперсії виражаються елементарними формулами.

Для лінійної функції виду  $I_1 = b + aI$ , що підпорядкована нормальному закону розподілення, математичне сподівання і середньоквадратичне відхилення визначаються виразами  $m_{I_1} = am_I + b$ ;  $\sigma_{I_1} = a^2 \sigma_I$ .

Якщо ж ці функції значно відрізняються від лінійних, то формули можуть бути застосовані тільки при малих дисперсіях випадкових навантажень.

За запропонованою методикою проведено вибір параметрів фазозсуваючих елементів електропривода прямої дробарки зерна. Відзначимо, що густина розподілення навантаження прямої дробарки добре апроксимується нормальним законом Гауса:

$$f(I) = \frac{1}{\sigma_I \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(I-m_I)^2}{2\sigma_I^2}}.$$

Визначені стохастичні оцінки процесу зміни навантаження як в статичі (математичне сподівання, дисперсія), так і в динаміці (кореляційна функція, спектральна густина).

Кореляційна функція і спектральна густина даних процесів добре апроксимуються виразами виду

$$R(\tau) = \sigma^2 e^{-\alpha|\tau|} \cos \beta\tau; \quad s(\omega) = \frac{\sigma^2}{\pi} \left[ \frac{\alpha}{\alpha^2 + (\omega + \beta)^2} + \frac{\alpha}{\alpha^2 + (\omega - \beta)^2} \right].$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт, що характеризує інтенсивність згасання кореляційної функції;  $\beta$  – коефіцієнт, що визначає кутову частоту коливань.

У цьому розумінні коефіцієнти  $\alpha$  і  $\beta$  характеризують технологічний процес, що виконується електроприводом, а форма і вид кореляційної функції – стаціонарність і ергодичність процесу зміни навантаження.

Промодельовавши роботу електропривода сумісно з навантаженням (характеристики визначаються двома останніми рівняннями), за допомогою формуючого фільтра можливо визначити параметри фазозсуваючих елементів, що мінімізують дисперсію струму зворотної послідовності. У подальшому за ступенем розкиду навантаження і за характером згасання кореляційної функції проводиться коректування параметрів фазозсуваючих елементів залежно від зміни продуктивності привода.

Застосування АД з масивними феромагнітними елементами ротора для пуску (розгону) газотурбінного двигуна (ГТД). Для пуску ГТД використовуються АД загальнопромислового призначення типу 4АМ180М2, АИМ180М2, АМУ200LА2, АМУ200LВ2, які спроектовані на оптимальні режими роботи. Вони призначені для тривалої роботи у номінальному режимі при постійній частоті обертання і живленні від потужної мережі з синусоїдальною формою кривої напруги. Основними недоліками таких двигунів є великі кратності пускових струмів і незадовільні регульовальні властивості. Використання АД загальнопромислового призначення для електроприводів з важкими умовами пуску (розгону великих махових мас) виявилось неекономічним.

Для пуску ГТД пропонується використовувати АД з масивними феромагнітними елементами ротора. Такі двигуни, незважаючи на їхні деякі недоліки, мають такі переваги: менші кратності пускових струмів; збільшений пусковий момент.

Для електромеханічної системи пуску ГТД визначені вихідні дані та побудовані електромеханічні характеристики, розроблена математична модель навантаження АД, проведені теоретичні дослідження пуску ГТД від АД з частотно-залежними параметрами.

Для дослідження електромеханічної системи пуску ГТД необхідно розробити уточнену математичну модель системи ГТД з урахуванням навантаження та джерела живлення.

Електротепломеханічна система (ЕТМС) транспортування нафти нафтопроводом при застосуванні вбудованого суміщеного мотор-насосу. При транспортуванні нафтопродуктів витрачаються значні обсяги як електричної, так і теплової енергії. Враховуючи значні обсяги використання енергетичних та матеріальних ресурсів, актуальною є задача підвищення енерго- та ресурсоефективності системи транспортування нафти нафтопроводами. Існуюча система транспортування нафти нафтопроводом передбачає споживання електричної енергії для забезпечення напірного переміщення нафти відцентровими насосами і споживання теплової енергії для нагрівання нафти. Велика протяжність напірної ділянки нафтопроводу вимагає створення великих напорів (до 12 МПа), що зменшує надійність, збільшує величину витоків і внаслідок збільшення вимог до міцності обладнання збільшує його ресурсоемність. Нагрівання нафти здійснюється в більшості випадків за рахунок зовнішнього підведення тепла, що супроводжується значними його втратами і вимагає наявності спеціального обладнання.

Для підвищення енерго- та ресурсоефективності системи транспортування нафти нафтопроводом пропонується застосування суміщеного джерела гідравлічної і теплової енергії – вбудованого асинхронного мотор-насосу. Дана конструкція являє собою асинхронний двигун із зовнішнім ротором з масивними елементами магнітопроводу (МЕМ), який суміщено із робочим колесом осьового насосу.

Розроблено математичну модель електротепломеханічної системи транспортування нафти. Математична модель складається з таких блоків: асинхронний двигун, насос, гідравлічна система нафтопроводу з урахуванням зміни її опору в функції температури.

Для проектування вбудованого мотор-насосу необхідно розробити методику розрахунку оптимальної температури і в'язкості транспортування нафти. За допомогою розробленої математичної моделі необхідно розрахувати залежності зміни корисної потужності двигуна нафтового насосу на одиницю довжини нафтопроводу в функції температури нафти для різних значень діаметрів трубопроводу та швидкостей потоку нафти ЕТМС, на підставі величини оптимальної температури нафти розрахувати необхідний ККД електродвигуна вбудованого мотор-насосу, здійснити корегування параметрів робочого режиму ЕТМС з урахуванням зміни температури за довжиною нафтопроводу.

Вбудований асинхронний мотор-насос буде запропонований для модернізації існуючих, а також для новозбудованих нафтопроводів.

Дослідження однофазних асинхронних двигунів при періодичному навантаженні. Метою дослідження є визначення впливу періодичного навантаження, що залежить від кута повороту ротора  $M_c = f(\gamma)$ , на режими однофазних асинхронних двигунів (ОАД) та оцінка сту-

пеня впливу моменту інерції, ємності конденсатора на характеристики квазістатичних режимів при періодичному й постійному навантаженні.

Для дослідження та аналізу квазістатичних режимів використана математична модель ОАД у системі MATLAB і її розширенні Simulink, яка доповнена блоками врахування періодичного навантаження та розрахунку параметрів квазістатички. Як об'єкт дослідження обраний однофазний конденсаторний двигун малої потужності (номінальна потужність  $P_n = 30$  Вт) із двофазною розподіленою обмоткою статора, числом пар полюсів  $p = 2$ , моментом інерції ротора двигуна  $J_p = 0,00002 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ . Аналізувалися навантаження з однаковим еквівалентним моментом опору  $M_{ce}$ , у якості якого був прийнятий середній момент  $M_{ср}$  за період його зміни.

При дослідженні квазістатичних режимів однофазного конденсаторного двигуна виявлені значні пульсації електромагнітного моменту, частоти обертання ротора ( $\delta\omega_r = 80\text{--}134$  %), струмів статора ( $\delta i = 10\text{--}40$  %), що призводить до збільшення потужності, яка споживається, зниження корисної потужності двигуна і, отже, до зменшення коефіцієнта корисної дії (ККД).

Проведено дослідження впливу величини ємності робочого конденсатора і моменту інерції на величини  $\delta\omega_r$ ,  $\delta i$ . Зі збільшенням  $C_p$  з 1,5 до 3,0 мкФ ступінь нерівномірності обертання  $\delta\omega_r$  при  $M_c = f(\gamma)$  знижуються на 3,4 %.

При моменті інерції привода  $J = 3 \cdot 10^{-5} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$  ступінь нерівномірності обертання становить 49,5 % при  $M_c = \text{const}$ , а у випадку  $M_c = f(\gamma)$  збільшується в 3,35 рази і становить 134 %. У той же час  $\delta i$  при  $M_c = f(\gamma)$  і  $J = 3 \cdot 10^{-5} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$  дорівнює 38,37 %. При збільшенні моменту інерції в 1,33 рази знижуються відносні величини пульсацій:  $\delta\omega_r$  – на 66 %,  $\delta i$  – на 73 %.

Виявлено зниження ККД на 9,6 % у порівнянні з його значенням при постійному навантаженні. Застосування моделі квазістатички при варіюванні величини ємності дало змогу підвищити ККД при періодичному навантаженні на 5,6 % у порівнянні з його значенням при застосуванні конденсаторів, оптимальних за умовами статички ( $C_p = 1,5$  мкФ). Визначено значення ємності робочого конденсатора, при якому ККД максимальний у квазістатичному режимі (дорівнює 2,5 мкФ). Визначено аналітичну залежність  $\eta = f(J, C_p)$  при постійному й періодичному моментах опору з використанням методу планування експерименту, яка буде використана при оптимізаційних розрахунках.

Проведені дослідження підтвердили необхідність врахування характеру зміни моменту опору для однофазних асинхронних двигунів, а також уточнення величини ємності робочого конденсатора з метою підвищення енергетичних показників у робочих режимах при періодичному навантаженні.

**Електричні машини з постійними магнітами.** В Інституті електродинаміки НАН України протягом кількох років активно проводяться дослідження в галузі розробки і створення електромеханотронних перетворювачів енергії (ЕМПЕ) з постійними магнітами (ПМ) і концентрацією магнітного поля.

Результати виконаних досліджень показують, що електричні машини з ПМ у складі ЕМПЕ мають переваги у порівнянні з традиційними машинами. Відомо, що величини корисної компоненти магнітної індукції в зазорі електричних машин знаходяться в діапазоні  $B_\delta = 0,4 \dots 1,1$  Тл і що граничні величини  $B_\delta$  збільшились не істотно за останні десятиліття розвитку електричних машин. Це положення може бути змінено на краще завдяки використанню в сукупності як досягнень у галузі створення сучасних магнітотвердих матеріалів, так і в розробці нових конфігурацій магнітних систем з концентрацією магнітного поля.

При однакових габаритах і конструктивному виконанні різних електричних машин електромеханічна ефективність буде більшою у тієї машини, яка допускає вище лінійне навантаження і більш високу магнітну індукцію. Сучасні рідкоземельні ПМ на основі

з'єднання "ніодим-залізо-бор" здатні забезпечити максимальну індукцію в повітряному зазорі навіть без концентрації потоку на рівні 0,6...0,8 Тл, а з концентрацією магнітного потоку індукція в повітряному зазорі може перевищувати залишкову індукцію ПМ. Таким чином, за умови зберігання сумарних втрат в електричній машині з ПМ може бути підвищене лінійне навантаження, що і пояснює високу електромеханічну ефективність електричних машин з ПМ у порівнянні з іншими типами безконтактних електродвигунів змінного струму. Такі переваги дають змогу застосовувати їх у різних пристроях широкого діапазону одиничної потужності, у тому числі в безредукторних електроприводах безпосередньої дії (Direct Electric Drive). Електропривод на базі таких двигунів може не тільки успішно конкурувати з уже відомими технічними рішеннями, але і знайти нові сфери застосування як елементна база мехатроніки і робототехніки, у транспортних системах, пристроях складної побутової техніки, приводах насосів і вентиляторів, у приводах електромобілів та морської техніки.

Протягом останнього року активно проводились дослідження в галузі формування інноваційних магнітних систем з підвищеною щільністю магнітної енергії і заданим характером розподілу магнітного поля стосовно електромеханотронних перетворювачів енергії ротаційного та лінійного руху нового покоління [1–4, 9, 10]. В результаті виконання роботи з розробки ЕМПЕ с ПМ отримано такі результати:

- розроблено інноваційні системи збудження на основі ПМ і феромагнітних концентраторів магнітних потоків зі спеціальною формою і поперечним перерізом, які забезпечують підвищення величини магнітної енергії у сфері енергоперетворення;

- розроблено способи мінімізації пульсацій електромагнітного моменту в зубцево-пазових структурах шляхом надання спеціальної форми полюсам, виконання скосів на роторі або розміщення спеціальних клинів з невисокою магнітною проникністю в пазах електричної машини;

- проведено експериментальні дослідження процесів на фізичних моделях з метою одержання найбільш раціональних конструктивних рішень з урахуванням наступних критеріїв: мінімальна маса і габарити ЕМПЕ, енергозбереження і високі динамічні характеристики.

Складні технологічні проблеми виробництва електричних машин нового типу можуть бути успішно вирішені шляхом використання технологій, розвинених в інших галузях електротехнічного та машинобудівного виробництва. Передбачається використання існуючих і нових технологій для розробки електричних машин. Як елементи системи збудження в машинах можуть використовуватися високоенергетичні постійні магніти та ферритові магніти, вартість яких істотно нижча.

У результаті виконання роботи будуть вирішені такі завдання:

- розробка та створення електричних машин з безпазовими і зубцево-пазовими структурами на основі ПМ з метою отримання оптимальних конфігурацій магнітних систем зі збільшеними електричними (лінійні струмові навантаження) і магнітними (магнітна індукція в зазорі) навантаженнями;

- розробка, проектування і створення фізичних моделей електричних машин з ПМ та виконання експериментальних досліджень з метою перевірки і підтвердження прийнятих теоретичних положень;

- дослідження перехідних процесів в ЕМПЕ, розробка ефективних алгоритмів керування з урахуванням можливостей сучасних мікропроцесорних систем управління.

Інститут гідромеханіки НАН України та Інститут електродинаміки НАН України спільно розробляють вітроенергетичну установку з вертикальною віссю обертання вітроротора (ВВО). У конструкції вітроротора застосований механізм керування положенням лопатей. Для вітроенергетичної установки з ВВО був розроблений, виготовлений і випробуваний електрогенератор спеціального типу з ПМ на роторі потужністю 1 кВт. Спираючись на дані, отримані експериментальним шляхом, слід зазначити, що розроблений електрогенератор має високу переважувальну здатність, а його характеристики узгоджуються з навантажувальними характеристиками експериментального зразка вітроротора з ВВО. В даний час

розробляється вітрогенератор потужністю 5 кВт. Також розробляється керований електро-двигун з ПМ, призначений для використання в електроприводі гідродинамічного нагрівача. Нагрівання рідини в такому нагрівачі відбувається не за рахунок перетворення електричної енергії в теплову, а шляхом перетворення механічної енергії рухомої рідини (використовується ефект кавітації) в теплову енергію. Використання керованого двигуна з ПМ в електроприводі нагрівача дає можливість здійснювати опалення або гаряче водопостачання при оптимальному споживанні електроенергії.

*Таким чином, у 2009 році отримані такі наукові результати.*

Науково обгрунтовані способи підвищення магнітної індукції в зазорі електромеханотронних перетворювачів енергії з постійними магнітами шляхом формування комбінованих магнітних систем на основі плоских сегментів постійних магнітів і трикутних феромагнітних концентраторів магнітних потоків та одержано залежності їх моменту, магнітної індукції від геометричних параметрів, що забезпечило подальший розвиток теоретичних засад проектування та покращення техніко-економічних характеристик перетворювачів енергії цього типу.

Вперше науково обгрунтовано принципи керування автономним машинно-вентильним комплексом на основі асинхронного генератора, в якому напівпровідниковий перетворювач забезпечує генератор реактивною потужністю, змінює його ковзання залежно від навантаження, виконує функції випрямляча та формує крутоспадні і жорсткі зовнішні зварювальні характеристики.

Розвинуто метод моделювання по частинах складних машинно-вентильних систем з асинхронними машинами в області об'єднання їх структурних елементів, що вперше забезпечило створення математичних моделей таких комплексів з асинхронним генератором з двома статорними обмотками і випрямлячем.

Створено нові математичні моделі асинхронних машинно-вентильних генеруючих комплексів з використанням методу припасування, що забезпечило на порядок менший час розрахунку електромагнітних і електромеханічних процесів без втрати точності.

Для підвищення енергоефективності асинхронних електроприводів: розроблено математичні моделі визначення їх параметрів при випадкових та періодичних навантаженнях; вдосконалено алгоритми визначення параметрів заступної схеми АД за даними дослідження електромагнітного поля методом кінцевих елементів.

Крім цього розроблено: математичну модель електротепломеханічної системи транспортування нафти нафтопроводом; математичну модель і програму в системі імітаційного та структурного моделювання MATLAB-Simulink для дослідження режимів роботи АД електромеханотронних систем при довільних структурах та схемах з'єднання електромеханічної та напівпровідникової складової системи.

Потенційні споживачі одержаних наукових і науково-технічних результатів: електромашинобудівні підприємства України, що виготовляють електричні машини та електромеханічні комплекси на їх основі для застосування в енергетиці і автоматичній, у видобувній та переробній галузях, транспорті, будівництві, сільському господарстві.

За звітний період опубліковано 11 статей, одержано 2 патенти на винаходи. Підготовлено і подано до друку 1 монографію і 5 статей. Крім цього подана заявка на винахід.

У 2010 році планується продовжити розвиток теорії машинно-вентильних генеруючих систем загальнопромислового і спеціального призначення, розробку уточнених алгоритмів проектування та формування енергоефективних режимів з урахуванням функціональної інтеграції складових електромеханічних систем і особливостей умов їх експлуатації, розробку інноваційних систем збудження електричних машин на основі постійних магнітів і феромагнітних концентраторів магнітних потоків, розробку та дослідження експериментальних зразків електричних машин з напівпровідниковими перетворювачами у колах статора.

1. Афонин А.А., Гребеников В.В. Исследование беспазовых электрических машин с постоянными магнитами // Доп. НАН України. – 2009. – № 5. – С. 99–104.

2. Гребеников В.В., Козырский В.В., Петренко А.В. Цилиндрическая магнитоэлектрическая машина возвратно-поступательного движения // Техн. електродинаміка. – 2009. – № 2. – С. 53–57.
3. Гребеников В.В., Прыймак М.В. Исследование влияния конфигурации магнитной системы на моментные характеристики электродвигателей с постоянными магнитами // Электротехника и энергоэлектрика. – 2009. – № 2. – С. 57–60.
4. Гребеников В.В., Прыймак М.В. Моделирование магнитных полей в электромеханических преобразователях энергии с постоянными магнитами // Вісн. Кременчуцького держ. політехн. ун-ту ім. Михайла Остроградського. – 2009. – № 3 (56). – Ч. 2. – С. 70–73.
5. Мазуренко Л.І., Джура А.В., Дынник Л.Н. Однопостовой автономный сварочный комплекс. Часть 2: Алгоритмы управления, результаты моделирования // Вісн. Кременчуцького держ. політехн. ун-ту ім. Михайла Остроградського. – 2009. – № 4 (57). – Ч. 1. – С. 128–132.
6. Мазуренко Л.І., Джура О.В., Динник Л.М., Пантелєєв Г.Л. Однофазний асинхронний генератор з регульованою перевантажувальною здатністю і автостабілізацією напруги // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук пр. – К.: ІЕД НАНУ. – 2009. – Вип. 22. – С. 38–43.
7. Мазуренко Л.І., Джура А.В., Дынник Л.Н., Соловьев В.В. Однопостовой автономный сварочный комплекс. Часть 1: Математическая модель силовой части // Вісн. Кременчуцького держ. політехн. ун-ту ім. Михайла Остроградського. – 2009. – № 3 (56). – Ч. 2. – С. 145–149.
8. Мазуренко Л.І., Попович О.М., Гребеніков В.В., Джура О.В., Шуруб Ю.В., Вербовий А.П. Електромеханічні перетворювачі енергії // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук пр. – К.: ІЕД НАНУ. – 2009. – Вип. 23. – С. 48–56.
9. Пат. на корисну модель № 4183 Україна. Магнітоелектричний лінійний генератор / В.В. Гребеніков, А.В. Петренко. – 2009. – БИ № 11.
10. Пат. на корисну модель № 39458 Україна. Плавниковий рушій з електромагнітним приводом / А.А. Афонін, В.В. Гребеніков, В.П. Каян. – 2009. – БИ № 4.