

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

ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ЕНЕРГІЇ

Наведено основні наукові результати відділу електромеханічних систем за 2008 рік, пов'язані з подальшим розвитком теорії, розробкою конструкцій, рекомендацій по проектуванню асинхронних генераторів і двигунів, електричних машин з постійними магнітами та вентиляльно-індукторних машин.

Приведены основные научные результаты отдела электромеханических систем за 2008 год, связанные с дальнейшим развитием теории, разработкой конструкций, рекомендаций по проектированию асинхронных генераторов и двигателей, электрических машин с постоянными магнитами и вентиляльно-индукторных машин.

Роботи 2008 року були спрямовані на подальше вирішення проблеми підвищення ефективності процесів електромеханічного перетворення енергії в електричних машинах. Тому вони пов'язані з подальшим розвитком теорії, розробкою конструкцій, схемних рішень та рекомендацій по проектуванню трифазних асинхронних генераторів (АГ) і допоміжних однофазних асинхронних генераторів (ОАГ) для автономних зварювальних комплексів (АЗК), асинхронних двигунів (АД), вентиляльно-індукторних машин, електричних машин з постійними магнітами для електромеханічних систем різного призначення. Не менш важливими є рекомендації щодо несинхронного включення генераторів у мережу.

Асинхронні генератори. *Допоміжні генератори* АЗК необхідні для живлення печей сушіння електродів, електроінструменту, освітлення тощо. Проведений техніко-економічний аналіз можливих схемних рішень допоміжних ОАГ показав, що на сьогодні з погляду надійності і економічності найбільш перспективно проектувати генератори з ємнісними системами збудження (СЗ) або вентиляльно-ємнісними при незначній потужності напівпровідникового регулятора реактивної потужності. Підтвердженням цьому є позитивні відгуки споживачів на розроблені у відділі допоміжні генератори зварювальних комплексів потужністю 2 і 3 кВт.

Високою стабільністю напруги і перевантажувальною здатністю відрізняються ОАГ, СЗ яких функціонує відповідно до принципу автостабілізації напруги (ОАГ з компаундуванням).

Цьому технічному рішенню в дослідженнях, пов'язаних з розробками допоміжних генераторів зварювальних комплексів, приділено основну увагу. Одну зі схем ОАГ з автостабілізацією напруги отримано на базі асинхронної машини (АМ) з послідовно-паралельним з'єднанням обмоток статора і чотирикратним шунтуванням реактивними елементами (рис. 1). Її статичні характеристики розраховані по запропонованій методиці, що базується на основі методу симетричних складових і рівнянь включення [6]. При цьому одержано аналітичні вирази для визначення вхідної провідності генератора $\dot{y}_{вх}$, а також напруг навантаження \dot{U}_H , нульової \dot{U}_0 і зворотної складової \dot{U}_2 .

Отримана адекватність (рис. 2) експериментальних і розрахункових результатів досліджень ОАГ (розрахункової U_H і експериментальній U_{HE} вихідної

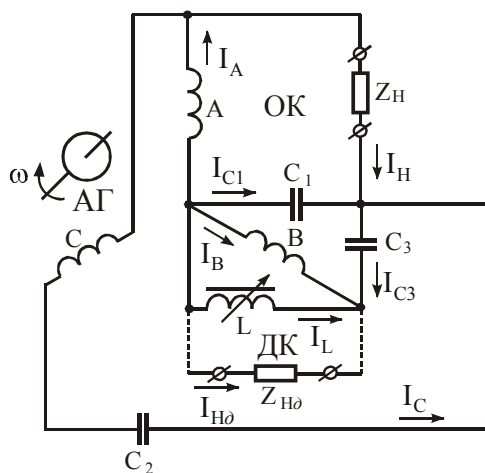


Рис. 1

напруги генератора по основному каналу (ОК); розрахункових U_{C1} , U_{C2} , U_{C3} і експериментальних U_{C1E} , U_{C2E} , U_{C3E} напруг на конденсаторах; струмів фаз генератора (I_A , I_B , I_C – розрахункові, I_{AE} , I_{BE} , I_{CE} – експериментальні); струму дроселя (I_L – розрахунковий, I_{LE} – експериментальний)).

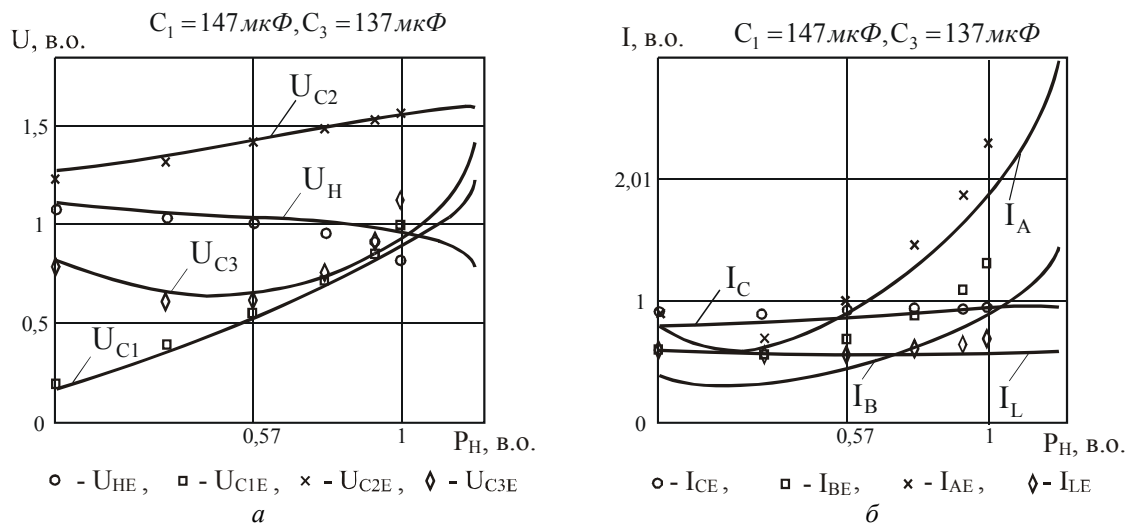


Рис. 2

Регулювання перевантажувальної здатності ОАГ (рис. 1) запропоновано здійснювати зміною ємностей частини конденсаторів системи збудження при збереженні співвідношення між ними. Встановлено, що коефіцієнт використання габариту машини в режимі роботи на навантаження активного характеру за рахунок доданого допоміжного каналу ДК відбору потужності може бути збільшений з 0,55...0,57 до 0,7...0,73. Діапазон зміни вихідної напруги ОАГ по основному каналу ОК у режимах роботи, в яких відсутні теплові перевантаження в міді статора, склав $220_{-0\%}^{+8\%}$, а по допоміжному – $220_{-14\%}^{+1\%}$. До допоміжного каналу рекомендується підключати освітлювальне навантаження і малопотужний інструмент. При параметрах системи збудження, що забезпечують величину максимальної потужності ОАГ на рівні паспортної потужності АМ, даний генератор дає змогу проводити від нього пуск однофазних двигунів з кратністю пускового струму до 7 і номінальною потужністю 27,5 % від потужності АМ, на базі якої виконаний генератор.

Зварювальні генератори. Схема з ємнісним збудженням також розглядалася як одна з базових схем для одно- і багатопостових зварювальних генераторів. Запропоновано доповнювати АГ з ємнісною СЗ напівпровідниковими регуляторами зварювального струму, живлення яких здійснюється від загального випрямляча.

Розроблено математичну модель зварювального комплексу (рис. 3) і алгоритм керування його постовими перетворювачами [7].

Дослідженнями встановлено наступне:

- для надійної роботи зварювального генератора за схемою рис. 3 з числом постів 2, кожний з яких розрахований на зварювальний струм до 250 А, потужність АГ повинна бути не менше 20 кВт;

- умовою максимуму номінальної потужності генератора є насичення його магнітного кола на ХХ ($k_{\mu} \geq 1,7$);

- застосування широтно-імпульсних регуляторів (ШІР) забезпечує незалежну роботу постів (вплив у межах 1...2 %), безпечну напругу ХХ, плавне регулювання зварювального струму і його форсування в режимі короткого замикання.

ШІР можуть виконуватися і з індивідуальними випрямлячами з метою забезпечення більш легкого запалення дуги.

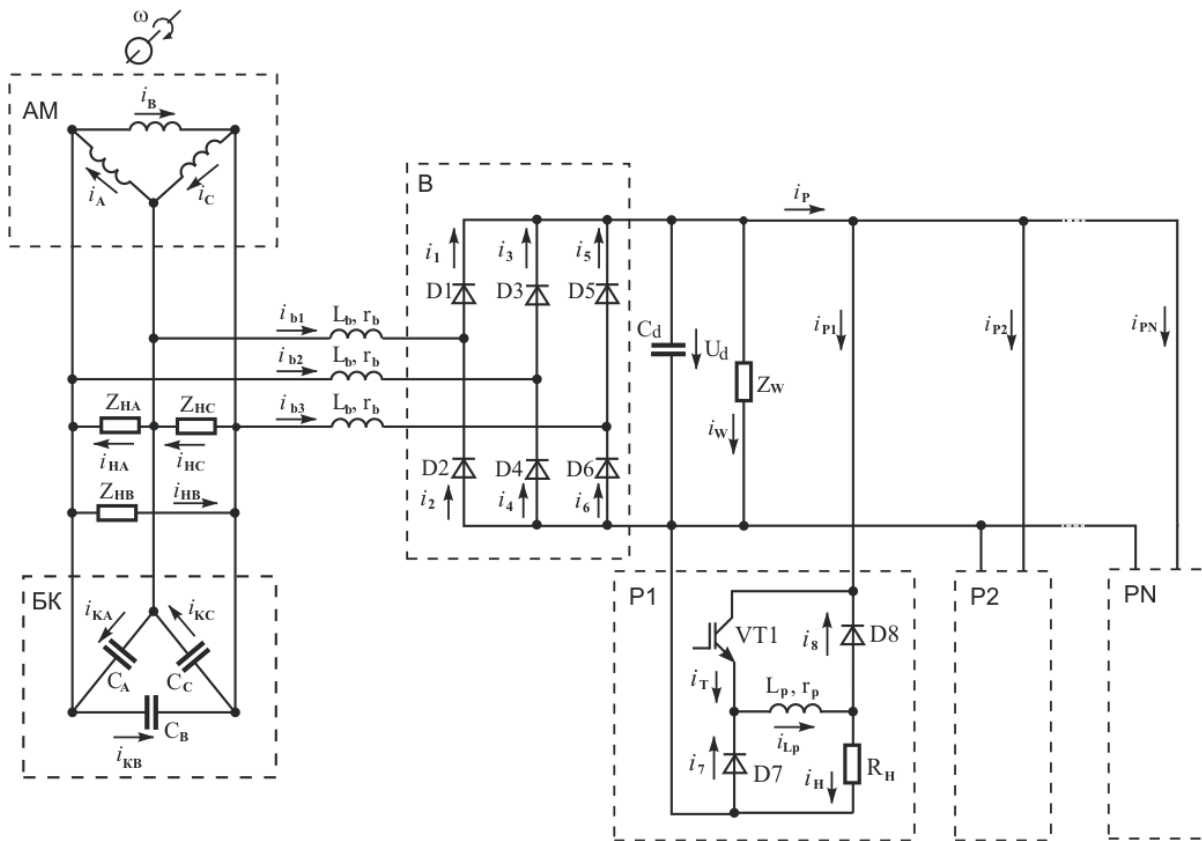


Рис. 3

Асинхронні двигуни. Врахування масивних елементів магнітопроводів при проектуванні асинхронних двигунів. Сучасний розвиток перетворювальної та обчислювальної техніки створює передумови для розширення сфери застосування спеціалізованих асинхронних машин та машин традиційної конструкції в спеціальних режимах. Застосування спеціалізованих асинхронних машин дає змогу максимально узгодити їх властивості з вимогами навантажувального механізму і забезпечити суттєве підвищення техніко-економічних показників електромеханічних систем. Магнітопроводи таких машин часто мають масивні елементи, що забезпечує раціональне суміщення з навантажувальним механізмом (елементи конструкції механізму є елементами конструкції АД) та ефективне формування необхідних механічних характеристик.

До асинхронних машин з масивними елементами магнітопроводу (МЕМ) відносяться АД з різними конструкціями масивних феромагнітних роторів. Ці ротори мають частотозалежні параметри і забезпечують високу добротність пуску. Вони ефективно використовуються в умовах частих та важких пусків, при параметричному регулюванні швидкості. Частотозалежність параметрів забезпечується завдяки нелінійності процесів, що пов'язані з наявністю вихрових струмів у МЕМ: із витісненням потоку на периферію магнітопроводу та змінною величиною втрат у ньому. Подібні процеси мають місце і в АД зі зменшеною висотою спинки ярма ротора. Наприклад, у занурених АД привода свердловинних насосів, у деяких типорозмірах двополюсних двигунів загальнопромислового призначення. Зменшення ярма ротора призводить до проходження змінного магнітного потоку через вал, наведення в ньому вихрових струмів та їх участі в процесі електромеханічного перетворення енергії. Крім перелічених конструкцій до АД з МЕМ можна віднести АД з шихтованим магнітопроводом, що набуває властивостей масивного при роботі у спеціалізованих режимах, які пов'язані з підвищенням частоти живлення.

Розрахунок характеристик АД з МЕМ ротора ускладнюється специфікою його процесів, зокрема, тривимірним розподілом магнітного поля, а саме: краєвими ефектами, витісненням магнітного потоку з магнітопроводу вихровими струмами, нелінійністю параметрів

та несинусоїдністю процесів. Найбільш точно таку задачу можна розв'язати методом кінцевих елементів (МКЕ) у тривимірній постановці. Але це потребує значного машинного часу, і в практиці проектування АД цей метод частіше використовується для тестування більш простих моделей. Ефективність методів проектування можна суттєво покращити, якщо використовувати точні польові підходи для визначення залежностей зміни інтегральних параметрів АМ і застосовувати їх при розрахунках режимів роботи. Тому для створення ефективних конструкцій АД з МЕМ ротора та дослідження режимів їх роботи розроблена математична модель визначення параметрів ротора таких двигунів.

Розроблена математична модель визначення параметрів ротора АД з МЕМ враховує параметри магнітного поля в роторі по боковій і торцевій поверхнях, у лобових зонах і дає змогу отримати квазітривимірний розв'язок задачі, який враховує особливості складного тривимірного розподілу магнітного поля і не потребує додаткового уточнення. Дана модель дозволяє підвищити ефективність проектування АД з МЕМ ротора за рахунок достатньо точного визначення параметрів магнітного поля ротора МКЕ, мінімізації обсягу польових розрахунків завдяки аналізу лише області ротора (параметри поля серійного статора АД із необхідною точністю визначаються традиційними методами) і мінімізації їх кількості при визначенні нелінійних залежностей зміни параметрів ротора для подальшого їх використання при розрахунках параметрів експлуатаційних режимів АД коловими методами.

Визначення параметрів АД з МЕМ ротора, зокрема з масивним феромагнітним ротором (МФР), виконується при застосуванні математичної моделі, в якій всі процеси в роторі, у тому числі і в масивному магнітопроводі з розподіленими вихровими струмами еквівалентуються процесами в еквівалентних контурах струмів з зосередженими параметрами. Умовами еквівалентування є рівність втрат активної енергії та енергії магнітного поля при однаковій величині магнітного потоку взаємної індуктивності системи статор-ротор та частоті.

Врахування нелінійних властивостей параметрів АД з МЕМ ротора здійснено за рахунок визначення їх функціональної залежності при кожному значенні ковзання від незалежних змінних. Параметри по основному полю є функціями коефіцієнта насичення магнітного поля, що залежить від сумарної МРС машини. Параметри статора можуть визначатись за допомогою відомих методик. Активний опір та індуктивність розсіювання роторного контура при фіксованому ковзанні залежить від сумарної МРС машини.

Зміна параметрів контурів при розрахунках режимів роботи виконується в функції амплітуди сумарної МРС машини.

Розрахунок параметрів магнітного кола при наявності двох шляхів потоку взаємної індуктивності (по торцях та боковій поверхні) здійснюється при умові їх паралельного з'єднання, тобто при однакових значеннях падіння магнітного потенціалу на цих ділянках.

Параметри магнітного поля ротора по потоку бокової поверхні визначаються за допомогою двовимірної розрахункової моделі. Визначення параметрів магнітного поля ротора по потоку торцевих поверхонь виконується з урахуванням особливостей конструкції ротора з МЕМ [8].

Розрахунок результатуючих втрат потужності в роторі проводиться відповідно до припущення про паралельне з'єднання ділянок магнітного кола по боковій та торцевій поверхнях ротора.

Розрахунок параметрів електромагнітного поля ротора та залежностей втрат потужності за потоком розсіювання в лобовій частині виконується з урахуванням особливостей конструкції ротора з МЕМ [8]. У випадку МФР ці параметри та залежності визначаються за допомогою врахування краєвих ефектів при протіканні наведених струмів бокової поверхні ротора по краєвій (лобовій) зоні.

Для визначення параметрів еквівалентних контурів ротора з МЕМ при розв'язанні польової задачі в квазітривимірній постановці проводиться узгодження залежностей параметрів, що отримані без урахування взаємного впливу один на одного процесів у боковій, торцевій поверхнях та лобовій зоні.

Формування критерію визначення ефекту від урахування квазістатисти. З метою визначення, у якому випадку необхідно враховувати квазістатичні режими і який ефект буде при цьому, сформовано критерій k_1 визначення напружених квазістатичних режимів електромеханічних систем на базі АД [2].

За критерій k_1 , що визначає напружені квазістатичні режими, які пов'язані зі значними (резонансними) пульсаціями електромагнітного моменту, прийнято співвідношення електромеханічної та електромагнітної сталих $T_{МК} / T_E$. Від k_1 залежить якісна картина перехідного процесу. У найнесприятливішому випадку можливий резонанс, при якому величина електромагнітного моменту може істотно перевищити величину моменту опору, що призводить до перегрівання обмоток, підвищення вібрацій, до виходу з ладу двигуна. При відсутності резонансу виконується умова $k_1 > 2$. Повна величина співвідношення k_1 може бути отримана зміною параметрів АД й системи в цілому: моменту інерції привода J , числа пар полюсів двигуна p , критичного ковзання s_K , критичного моменту M_K . Істотний прояв електромагнітного перехідного процесу, коли резонансні явища найнебезпечніші, спостерігається при малих значеннях активного опору ротора (критичного ковзання) або для малого моменту інерції при підвищених значеннях частоти змушених коливань.

За допомогою даного критерію проведений аналіз серійних трифазних АД, спроектованих на різні синхронні швидкості, за ознаками доцільності врахування квазістатичного характеру робочого режиму при оптимальному проектуванні. Отримані результати дозволяють визначити область пошуку резервів поліпшення техніко-економічних характеристик АД.

Підвищення енергоефективності роботи АД для однофазної мережі. Трифазні АД, що живляться від однофазної мережі через фазозміщуючі модулі (трифазно-однофазний асинхронний електропривод), знаходять широке застосування завдяки простоті конструкції і високим енергетичним характеристикам. Останнє справедливо для двигунів, що працюють з постійним навантаженням. При змінному навантаженні енергетичні показники двигуна в зв'язку з високим споживанням реактивної потужності і збільшенням коефіцієнта несиметрії різко погіршуються, а режим холостого ходу в окремих випадках стає небезпечним через перегрівання однієї з фаз. При роботі трифазно-однофазного електропривода (ЕП) в широкому діапазоні зміни навантажень виникає необхідність регулювати або ємність фазозсуваючого конденсатора, або напругу живлення ЕП.

У трифазно-однофазних ЕП з одноелементним фазозміщуючим модулем симетричну систему напруг на фазних обмотках АД можливо отримати тільки при одному значенні коефіцієнта потужності АД (наприклад, при $\cos \varphi = 0,5$ для схеми Штейнметца).

У трифазно-однофазних ЕП з триелементним ємнісним фазозміщуючим модулем (рис. 4) можливо отримати симетричну систему фазних напруг при коефіцієнтах потужності $\cos \varphi = 0,5 \dots 0,86$, що відповідає зміні коефіцієнта потужностей АД загальнопромислового

призначення малої потужності (приблизно до 5 кВт) при симетричному трифазному живленні в діапазоні зміни навантаження 20...100 % від номінального.

Симетричний режим у схемі відповідно до рис. 4 можна забезпечити при довільному навантаженні, що відповідає коефіцієнтам потужностей, які лежать у вказаному діапазоні. Але для цього ємності всіх трьох фазозсуваючих конденсаторів повинні неперервно змінюватись за нелінійним законом. Тому через складність технічної реалізації неперервного регулювання ємностей конденсаторів доцільно обмежитись дискретним регулюванням з декількома ступенями регулювання ємностей.

Якщо двигун працює більшість часу із навантаженням, близьким до номінального, достатньо двох чи трьох ступенів (пусковий, робочий та холостого ходу), при цьому точка зрівноваженого режиму повинна бути в зоні номінального наван-

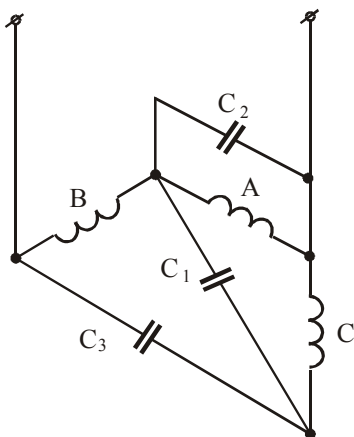


Рис. 4

таження. Якщо ж двигун працює в широкому діапазоні навантаження, причому час роботи при знижених навантаженнях (20...60 % від номінального) є значним, то пропонується [12] використовувати схему трифазно-однофазного електропривода з триелементним фазозміщуючим модулем по рис. 4 з дискретним триступеневим регулюванням ємностей конденсаторів, в якій у кожному з діапазонів зміни навантаження існує точка зрівноваженого режиму. Розглянута схема трифазно-однофазного електропривода забезпечує симетричний режим при трьох значеннях навантаження: 100, 62 та 25 %. При цих значеннях навантаження двигун має такі ж самі характеристики, що і при трифазному симетричному включенні. При всіх інших навантаженнях має місце несиметричний режим з додатковими втратами від струмів зворотної послідовності. Зменшення ККД за рахунок втрат від струмів зворотної послідовності не перевищує 3 %. Найбільш суттєво втрати від струмів зворотної послідовності виражені при 50 % навантаження.

Перемикання ступенів відбувається за допомогою напівпровідникових комутаторів та керуючого пристрою, що включає в себе датчики тих фазних напруг і струмів, що є найбільш чутливими до зміни навантаження і по яких може контролюватись рівень навантаження, а також мікропроцесорний пристрій, що визначає величини необхідних ємностей відповідно до навантаження.

Умовою вибору оптимальних ємностей є забезпечення фазового зсуву між струмом через конденсатор С1 та напругою на обмотці С 60° . Дослідження показали, що при виконанні цієї умови струм через конденсатор С2 буде відставати від напруги на обмотці С на 30° .

Важливою задачею для побудови керуючого пристрою є визначення параметрів робочого режиму електродвигуна, що є найбільш чутливими до зміни навантаження, і які можуть бути використані в каналі зворотного зв'язку системи дискретного регулювання ємностями фазозсуваючих конденсаторів. Дослідження показали, що в якості вхідних параметрів для керуючого пристрою доцільно використовувати напругу фази С і струм фази В. Причому чутливість датчика напруги фази С по відношенню до зміни навантаження є негативною за знаком (через обернено пропорційну залежність напруги фази С від навантаження), а чутливість датчика струму фази В по відношенню до зміни навантаження є позитивною за знаком (через прямо пропорційну залежність струму фази В від навантаження). Тому доцільно контролювати процеси перемикання ступенів за напругою фази С при зміні навантаження в напрямку зменшення і за струмом фази В при зміні навантаження в напрямку збільшення.

При застосуванні запропонованої схеми ККД АД при однофазному включенні менший приблизно на 3 % від ККД того ж АД при симетричному живленні. У трьох точках режим роботи АД є повністю симетричним.

Асинхронні двигуни турбомеханізмів. Існує багато різноманітних систем регульованих електроприводів турбомеханізмів. Найбільш перспективними вважаються системи на базі асинхронних двигунів і перетворювачів частоти та тиристорних перетворювачів напруги [3]. Система електропривода на основі перетворювача частоти і АД за основними критеріями (діапазон регулювання, плавність регулювання, припустиме навантаження при різних швидкостях) є найкращою, але в той же час вона є найскладнішою і має найвищу вартість серед інших типів електроприводів. Система електропривода на базі тиристорний перетворювач напруги – асинхронний двигун має найнижчу вартість, але за рахунок несинусоїдності підведеної напруги має низький коефіцієнт потужності. Тому необхідно таку систему доповнювати компенсуючими пристроями, що призводить до зростання її вартості. Перспективними в цьому напрямку є імпульсні перетворювачі напруги з безпосереднім зв'язком, які відрізняються простотою силової частини й системи керування і дають змогу одержувати необхідну якість вихідної напруги та експлуатаційних характеристик.

Для дослідження електромагнітних і механічних процесів в електроприводі турбомеханізму у блоці розширень Power System Blockset програмного пакета MATLAB було розроблено модель імпульсного перетворювача напруги з безпосереднім зв'язком, яка була доповнена моделлю АД та навантаження турбомеханізму. Для моделювання електромагнітних процесів в АД при живленні від імпульсного перетворювача напруги використані номінальні

дані серійного асинхронного двигуна 4A160M4У3. Були одержані розрахункові залежності миттєвих значень напруги на виході імпульсного регулятора, струмів статора і ротора двигуна, активної і реактивної потужностей, які показали, що імпульси вихідної напруги розташовані рівномірно по всьому періоду в межах огинаючої, що повторює напругу мережі. Напруги і струми симетричні щодо осі часу. Форма струму АД наближається до форми струму при живленні від мережі синусоїдної напруги.

За одержаними залежностями визначено коефіцієнт потужності АД. Із збільшенням частоти імпульсів вихідної напруги він наближається до значень коефіцієнта потужності АД при роботі в номінальному режимі і живленні від мережі.

Дослідження показали доцільність застосування імпульсних перетворювачів напруги з безпосереднім зв'язком в електроприводі турбомеханізмів.

Електричні машини з постійними магнітами. Проблеми ресурсо- і енергозбереження, розробка інтегрованих електроприводів безпосередньо пов'язані з розвитком інтелектуальної електромашинної технології, для якої особливий інтерес становлять безконтактні електронно-комутовані електричні машини (ЕМ) з магнітоелектричним збудженням, в яких використовуються сучасні високоенергетичні постійні магніти (ПМ) на основі рідкоземельних металів і сплавів або висококоерцетивні ферити.

У результаті проведених досліджень отримані наступні результати:

1. Розроблені нові типи ЕМ з ПМ з гладкими (безпазовими) і зубцево-пазовими структурами для циліндрових, дискових і лінійних конфігурацій з покращеними електричними і магнітними навантаженнями при оптимальному використанні активної частини.

2. Розроблені способи формування складних магнітних систем, що складаються з постійних магнітів і феромагнітних елементів, з метою отримання підвищених величин магнітної індукції у збільшених робочих зазорах ЕМ і верифікація їх за допомогою математичних і фізичних моделей.

3. Розроблені способи формування магнітних систем збудження з необхідним законом розподілу поздовжньої компоненти магнітної індукції в зазорі.

4. Проведено дослідження експериментального зразка ЕМ, конструкція якого має зубцево-пазову структуру статора і ротор з постійними магнітами і феромагнітними концентраторами магнітного потоку.

5. Розроблена і виготовлена фізична модель генератора для вітроустановки (спільно з Інститутом гідромеханіки НАНУ) [10].

Як показують дослідження, створені ЕМ нового покоління з використанням постійних магнітів характеризуються кращим використанням активної частини, зниженням маси і габаритів, підвищенням ККД і питомої електромагнітної потужності, зниженням рівня втрат, зменшенням шумів і вібрацій у порівнянні з відомими [1, 4]. Такі переваги дають змогу застосовувати ЕМ з ПМ нового типу в таких сферах, як машинобудування, транспорт, авіація, привод електромобілів і об'єктів морської техніки [11], вітроустановки, пристрої складної побутової техніки, приводи насосів, вентиляторів тощо.

Вентильно-індукторні двигуни. Сучасні тенденції розвитку електропривода пов'язані з успіхами у розвитку силової електроніки та мікроелектроніки. В свою чергу ці тенденції розвитку електропривода стимулювали пошук нових технічних рішень у сфері електричних машин. Одне з таких перспективних рішень – вентильно-індукторний двигун (ВІД).

Переваги ВІД над іншими типами машин очевидні: великі можливості керування, простота і технологічність конструкції, відсутність операції заливання білячої клітки ротора або оснащення ротора постійними магнітами, висока ремонтпридатність, основні втрати зосереджені в обмотках статора і легко відводяться (ротор холодний). При цьому вартість виробництва в два-три рази менша, ніж інших електричних машин (асинхронних з короткозамкненим ротором, з постійними магнітами тощо).

Вентильно-індукторні двигуни доцільно впроваджувати в системи електроприводів промисловості, транспорту, комунального господарства, в побутовій техніці, медицині. Вони

успішно можуть конкурувати з асинхронними, синхронними двигунами традиційної конструкції.

Розвиток нового класу машин, яким є клас вентильно-індукторних машин (силова версія крокових машин), йде у напрямку поглиблення теорії, пошуку нових конструкцій та систем керування, які могли б забезпечити їх використання у різних галузях промисловості.

У зв'язку з цим розглянуто теоретичні заходи перетворення енергії у ВІД та різні способи визначення його електромагнітного моменту. Запропоновано методику розрахунку втрат у сталі магнітопроводу та розроблено математичну модель ВІД з використанням обчислювального комплексу Matlab-Simulink-Femlab. Розроблено алгоритм роботи системи керування ВІД та експериментальний зразок у габаритах АД 4AA56A4. Результати його дослідження свідчать про можливість збільшення його ККД на 5...7 % у порівнянні з базовим варіантом [12].

Турбогенератори. Досліджено несинхронне включення в мережу турбогенератора (ТГ) потужністю 250 МВт (спільно з відділом №10 Інституту електродинаміки НАН України та ДП "Електроважмаш", м. Харків) [5].

Математична модель. Дослідження режиму несинхронного включення турбогенератора 250 МВт у мережу проведено з використанням програмного пакету MATLAB-SIMULINK (додаток Sim Power Systems). Синхронний генератор у програмі представлений моделлю Synchronous Machine pu Standart. Адекватність математичної моделі реальним електромагнітним процесам в турбогенераторі 250 МВт підтверджує наступне:

- значення ударного струму при трифазному короткому замиканні (КЗ) на затискачах турбогенератора практично співпадає з розрахованим значенням по класичних формулах;
- максимальне значення електромагнітного моменту при несинхронному включенні спостерігається при куті розузгодження напруг турбогенератора і мережі $\Theta = 120^\circ$.

Дослідження несинхронного включення турбогенератора в мережу. Діапазон кутів розузгодження між напругами генератора і мережі, коли можливо несинхронне включення, розширюється зі зростанням індуктивного опору мережі. Так, при $x_C = 0,05$ в.о. він складає $0...60^\circ$, а при $0,1$ в.о. – $0...80^\circ$. У цьому випадку струм статора не перевищує п'ятикратного значення.

Вже при співвідношенні параметрів мережі і турбогенератора $\frac{x_C}{x_d} = 1,6$ струм і електромагнітний момент є допустимими при несинхронному включенні.

Оцінку можливості несинхронного включення ТГ в мережу необхідно проводити за величиною виникаючого електромагнітного моменту, який представляє для ТГ найбільшу небезпеку і який при кутах розузгодження $\Theta = 110...120^\circ$ між напругами даного генератора і мережі перевищує момент при трифазному КЗ в 1,5 рази (розрахунковим при визначенні механічної міцності є режим КЗ). При цьому допустимими є п'ятикратні струми у порівнянні з номінальними. При опорі мережі $x_C = 0,05$ в.о. і зміні кутів розузгодження в діапазоні $\Theta = 60...180^\circ$ струми перевищують п'ятикратні значення (при $\Theta = 180^\circ$ в два рази).

Результати дослідження можуть бути використані при оцінці можливості несинхронного включення гідрогенераторів.

Висновки. Сукупність нових математичних моделей, алгоритмів і комп'ютерних програм, а також результати дослідження, принципи побудови електричних машин сприяють підвищенню енергетичних показників електромагнітних систем.

Планується проведення комплексу робіт, пов'язаних з подальшим розвитком теоретичних методів аналізу електромагнітних процесів, із створенням експериментальних зразків нових типів електричних машин та їх всебічним дослідженням.

Впровадження розробок очікується на вітчизняних електромашинобудівних підприємствах.

1. *Афонин А.А., Гребеников В.В.* Инновационные технологии электрических машин с постоянными магнитами и двухсторонним возбуждением магнитного поля // Доп. НАН України. – 2008. – № 6. – С. 87–93.
2. *Бібік О.В.* Формування критерію визначення ефекту від урахування квазістатика // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2008. – Вип. 20. – С. 40–41.
3. *Вербовой А.П.* Особенности работы и выбор системы электропривода (преобразователь-асинхронный двигатель) турбомеханизмов // Пр. Ін-ту електродинаміки НАНУ: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2008. – Вип. 20. – С. 45.
4. *Гребеников В.В., Козырский В. В., Петренко А.В.* Цилиндрическая магнитоэлектрическая машина возвратно-поступательного движения // Техн. електродинаміка. – 2009. – № 2. – С. 53–57.
5. *Лесник В.А., Мазуренко Л.И., Федоренко Г.М., Чередирик В.И., Грубой А.П.* Исследование несинхронного включения генераторов в сеть // Техн. електродинаміка. – 2009. – № 1. – С. 32–34.
6. *Мазуренко Л.И., Лісник В.Я., Джура О.В., Диннік Л.М.* Однофазный асинхронный генератор с регулируемой 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.И., Лісник В.Я., Диннік Л.М., Джура О.В.* Математична модель і алгоритм керування асинхронного зварювального генератора // Техн. електродинаміка. – 2008. – № 2. – С. 22–26.
8. *Попович О.М., Головань І.В.* Врахування масивних елементів магнітопроводу при проектуванні асинхронних машин // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2008. – Вип. 21. – С. 36–46.
9. *Шуруб Ю.В.* Оптимізація трифазно-однофазних асинхронних електроприводів з смісними багатоелементними фазозміщуючими модулями змінної структури // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2008. – Вип. 20. – С. 39–40.
10. *Пат. 84319 Україна / Гребеніков В.В., Довгий С.О., Каян В.П.* Вітросилова установка // БИ №19. – 2008.
11. *Пат. 39458 Україна / Афонін А.А., Гребеніков В.В., Каян В.П.* Плавниковий рушій з електромагнітним приводом // БИ №4. – 2009.
12. *Розробка методів та засобів забезпечення енергоефективності електромеханотронних перетворювачів енергії (договори № 685-06, 686-07, 687-08) // Звіт про наук.-досл. роботу (заключний). – ДР № 0107U000071 – 2008 р. – 153 с. // Наук. кер. НДР – зав. відділу №6 ІЕД НАНУ д-р техн. наук Л.І. Мазуренко.*