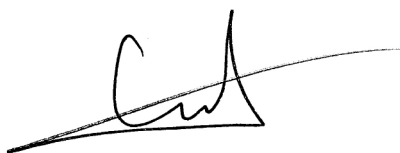


**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«НАЦІОНАЛЬНИЙ ГІРНИЧИЙ УНІВЕРСИТЕТ»**

Скалько Юрій Сергійович



УДК 62-83-52:621.313.333.2

**ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ
ВИСОКОВОЛЬТНОГО ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНОГО
АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА**

05.09.03 – Електротехнічні комплекси та системи

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Дніпропетровськ – 2011

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі електротехніки і енергетичного менеджменту Запорізької державної інженерної академії Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України та кафедрі електроприводу і автоматизації промислових установок Запорізького національного технічного університету Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України.

Науковий керівник:

доктор технічних наук, професор
Волков Олександр Васильович,
професор кафедри електротехніки
та енергетичного менеджменту Запорізької
державної інженерної академії Міністерства
освіти і науки, молоді та спорту України.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор
Чорний Олексій Петрович,
директор інституту електромеханіки,
енергозбереження та комп'ютерних технологій
Кременчуцького національного університету
імені Михайла Остроградського Міністерства
освіти і науки, молоді та спорту України;

кандидат технічних наук, доцент
Казачковський Микола Миколайович,
професор кафедри електропривода
Державного вищого навчального закладу
«Національний гірничий університет»
(м. Дніпропетровськ) Міністерства освіти і
науки, молоді та спорту України.

Захист відбудеться «23» червня 2011 р. о 14 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.080.07 при Державному ВНЗ «Національний гірничий університет» (м. Дніпропетровськ) Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України за адресою: 49027, м. Дніпропетровськ, просп. Карла Маркса, 19.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Державного ВНЗ «Національний гірничий університет» Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України за адресою: 49027, м. Дніпропетровськ, просп. Карла Маркса, 19.

Автореферат розіслано «__» _____ 2011 г.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради Д 08.080.07,
к.т.н., доцент



О.О. Азюковський

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Останніми роками в Україні і за кордоном приділяється підвищена увага розробці, дослідженню і промислому впровадженню високовольтних частотно-регульованих асинхронних електроприводів (ЧРАЕП) великої потужності, що створюються на основі дворівневих або багаторівневих трифазних автономних інверторів напруги (АІН) з широко-імпульсною модуляцією (ШІМ) вихідної напруги. Для даної потужності приводів найбільшою мірою виявляються відомі переваги ЧРАЕП: підвищена експлуатаційна надійність, пов'язана з використанням в ньому безконтактної електричної машини – короткозамкненого асинхронного двигуна (АД), високі енергетичні показники (коефіцієнт корисної дії, мережевий коефіцієнт потужності) і розширена сфера застосування (у тому числі – для механізмів, що працюють в запиленних, агресивних і вибухонебезпечних середовищах).

При створенні високовольтних ЧРАЕП великої потужності до теперішнього дня залишається невирішеною низка запитань, які виникають при регулюванні таких електроприводів (ЕП) та викликані істотно несинусоїдальною формою статорних струмів двигуна (внаслідок відносно низької частоти перемикання силових ключів інвертора, яка складає на практиці менше 500–1000 Гц). До таких питань відносяться: здійснення швидкодіючого обмеження вихідних струмів інвертора і оптимального енергозберігаючого керування для нединамічних ЧРАЕП зі скалярним та векторним керуванням, а також підвищення точності регулювання без установки датчиків на валу двигуна і формування нормованої високої якості статичних характеристик і електромеханічних перехідних процесів для динамічних ЧРАЕП з векторним керуванням. Для успішного і широкого впровадження високовольтних ЧРАЕП великої потужності в різних галузях господарства актуально та затребувано практикою вирішення відмічених технічних задач.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Основні наукові результати дисертаційної роботи отримані автором у процесі його участі як виконавця держбюджетних науково-дослідних робіт відповідно до тематичного плану наукових досліджень Запорізького національного технічного університету за темами:

– ДБ №02016 від 1 січня 2006 року за темою «Енергозберігаюче керування в системах автоматизованого електроприводу і удосконалення оплати електроспоживачів за реактивну енергію» (номер держреєстрації 0106U000363);

– ДБ №02018 від 1 січня 2008 року за темою «Розробка і дослідження нових ефективних видів електроприводу та енергозберігаючої перетворювальної техніки» (номер держреєстрації 0108U000274).

Мета роботи і завдання досліджень. Метою дисертаційної роботи є підвищення енергоефективності і точності регулювання координат високовольтного частотно-регульованого асинхронного електроприводу великої потужності, створеного на основі АІН-ШІМ, без використання датчиків на валу двигуна.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися такі основні завдання:

- розробка математичних і цифрових (комп'ютерних) імітаційних моделей, які призначені для використання в якості інструменту для дослідження електромагнітних і електромеханічних процесів (ЕМП), а також для дослідження втрат потужності у високовольтному ЧРАЕП з АІН-ШІМ;
- мінімізація втрат потужності в ЧРАЕП з АІН-ШІМ засобами автоматичного керування та розробка на цій основі енергозберігаючого автоматичного керування вказаним електроприводом;
- розробка способів ідентифікації з підвищеною точністю знаходження поточних параметрів режиму (проекцій потокозчеплення, швидкості) і внутрішніх параметрів АД, що живиться від високовольтного АІН-ШІМ;
- розробка швидкодіючого струмообмеження для високовольтного ЧРАЕП з АІН-ШІМ;
- кількісна і якісна оцінки електромагнітних і електромеханічних процесів високовольтного ЧРАЕП великої потужності з дворівневим і трирівневим АІН-ШІМ, що досягаються при використанні запропонованих способів ідентифікації за допомогою відомих і розроблених способів автоматичного керування.

Об'єктом досліджень є електромагнітні і електромеханічні процеси та втрати потужності у високовольтному ЧРАЕП великої потужності з АІН-ШІМ.

Предметом досліджень є способи ідентифікації параметрів частотно-регульованого АД та енергозберігаюче автоматичне керування високовольтним ЧРАЕП з АІН-ШІМ великої потужності.

Методи досліджень: метод узагальнених векторів, що використовується при математичному описі досліджуваного об'єкту; операторний метод, вживаний при розробці автоматичного керування; метод адаптивного керування з еталонною моделлю, що використовується при розробці способів ідентифікації параметрів двигуна; метод покоординатної оптимізації Гауса, що служить для мінімізації загальних втрат потужності в електроприводі; метод найменших квадратів, що використовується при здобутті аналітичних залежностей для оптимального керування; метод імітаційного моделювання, вживаний для обчислення загальних втрат потужності і розрахунку електромагнітних і електромеханічних процесів електроприводу; метод експериментального дослідження, що використовується для оцінки достовірності отриманих результатів.

Наукові положення:

1. Множення ортогональних проекцій ЕРС ротора на коректуючий коефіцієнт, розрахований у вигляді відношення значення проекції вектора ЕРС ротора на вісь, яка є перпендикулярною вектору статорного струму двигуна, до оцінного значення даної проекції, обчисленого через кутову частоту та проекції вектора потокозчеплення ротора, забезпечує підвищення точності ідентифікації потокозчеплення і швидкості ротора асинхронного двигуна при температурній зміні його активного статорного опору.

2. При несинусоїдальній формі статорних струмів значення електромагнітної сталої часу ротора асинхронного двигуна залежить прямо пропорційно від

інтегралу абсолютного значення різниці між модулем потокозчеплення ротора та добутком намагнічуючої проекції статорного струму на індуктивність намагнічування і зворотно пропорційно від інтегралу проекції узагальненого вектора ЕРС ротора на вектор потокозчеплення ротора двигуна, де згадані інтеграли узяті за однаковий інтервал часу.

3. Додавання до завдання модуля потокозчеплення ротора двигуна величини, пропорційної кореню квадратному із завдання на активну проекцію статорного струму, та одночасне збільшення модуляційної частоти силових ключів інвертора на величину, пропорційну кореню квадратному з модуля узагальненого вектора основної гармоніки статорного струму, забезпечує мінімізацію загальних втрат потужності в частотно-регульованому асинхронному електроприводі з АІН-ШІМ.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Одержані способи встановлення значень параметрів короткозамкненого асинхронного двигуна, які засновані на попередньому знаходженні проекцій узагальненого вектора ЕРС ротора двигуна через його фазні статорні напруги та струми, дозволяють вперше при істотно несинусоїдальній формі статорних струмів і насиченні магнітного кола двигуна визначати проекції потокозчеплення ротора і швидкість двигуна в широкому діапазоні зміни робочих навантажень і швидкостей (включаючи нульову швидкість) з врахуванням температурної зміни активних опорів статорних і роторних обмоток двигуна.

2. Розроблена математична модель загальних втрат потужності для ЧРАЕП з АІН-ШІМ, у якій вперше враховуються модуляційні втрати в двигуні і динамічні втрати в перетворювачі частоти, дозволяє точніше визначати загальні втрати потужності вказаного електроприводу.

3. Отримані аналітичні залежності, що вперше задають оптимальне керування за мінімумом загальних втрат потужності в ЧРАЕП з АІН-ШІМ при скалярному і векторному керуванні, дозволяють здійснити енергозбереження у вказаному електроприводі.

4. За результатами вперше виконаного порівняння за енергоефективністю запропонованого оптимального керування за мінімумом загальних втрат потужності з існуючими законами частотного керування АД (пропорційним, при постійності потокозчеплення ротора, за мінімумом статорного струму двигуна, економічним законом, отриманим М.П. Костенко) в електроприводі з АІН-ШІМ, встановлено, що найбільш близьким до оптимального є керування за мінімумом статорного струму АД, яке характеризується перевищенням загальних втрат потужності над оптимальним не більше, ніж на 4%.

5. Запропонований спосіб струмообмеження вихідного струму трифазного інвертора, який полягає в тому, що при перевищенні одним з фазних струмів інвертора допустимої для нього уставки примусово замикають силовий ключ даної фази інвертора, сполучений з полюсом інвертора, що має полярність напруги, протилежну до полярності поточного значення згаданого фазного струму, одночасно примусово замикають по одному силовому ключу в інших фазах

інвертора до полюса інвертора з протилежною полярністю напруги, дозволяє забезпечити гранично можливу швидкодію процесу струмообмеження.

Практична цінність отриманих результатів:

– запропоновані способи ідентифікації потокозчеплення ротора і швидкості АД дозволяють з високою точністю (з похибкою для потокозчеплень – менше 0,6%, для швидкості – менше 0,15%) визначити непрямим чином (через його фазні статорні напруги та струми) згадані параметри режиму двигуна в умовах істотно несинусоїдальної форми (при загальному коефіцієнті гармонік більше 20–60%) його статорних струмів у високовольтних ЧРАЕП великої потужності;

– розроблений спосіб струмообмеження дозволяє здійснити граничне за швидкодією (із запізнюванням, що визначається лише власною затримкою силових ключів інвертора) обмеження вихідних струмів трифазного АІН-ШІМ для ЧРАЕП із скалярним, квазівекторним і векторним керуванням, що запобігає виходу з ладу силових ключів інвертора та підвищує в цілому експлуатаційну надійність високовольтного ЧРАЕП великої потужності;

– імітаційні моделі, розроблені для дослідження електромеханічних процесів у високовольтних ЧРАЕП з трифазними дворівневим і трирівневим АІН-ШІМ при скалярному, квазівекторному і векторному керуванні, враховують фактичну несинусоїдальну форму напруг і струмів перетворювача частоти, нелінійність кривої намагнічування двигуна, дискретність керування і ідентифікації, характеризуються відхиленням від експерименту: для напруг і струмів – менш (3–7)%, для швидкості – менш (0,1–2)%, де менші значення відносяться до сталих, а більші – до динамічних режимів;

– запропоноване енергозберігаюче керування за мінімумом загальних втрат потужності в ЧРАЕП з АІН-ШІМ забезпечує зниження на (5–30)% загальних втрат в ньому і додаткове збільшення на (0,1–6)% його коефіцієнта корисної дії (ККД) в порівнянні з іншими відомими законами частотного керування;

– здійснені кількісна і якісна оцінки ЕМП високовольтного ЧРАЕП великої потужності з розробленим автоматичним керуванням і запропонованими способами ідентифікації параметрів при врахуванні типового налаштування систем підпорядкованого регулювання, фактичної несинусоїдальної форми вихідних напруг і струмів АІН-ШІМ, дискретного характеру роботи силових ключів інвертора та системи автоматичного керування (САК), дозволили визначити сферу застосування цього високовольтного ЧРАЕП: загальнопромислові приводи з однозонним і двозонним регулюванням швидкості та позиційний ЕП;

– запропоновані способи енергозбереження і автоматичного керування впроваджені у вітчизняному високовольтному ЧРАЕП (з перетворювачем частоти на основі АІН-ШІМ типа ПЧ-ТТП-200-6к-50 і двигуном типа 4АРМП потужністю 1600 кВт, напругою 6 кВ), розробленому і виготовленому у ВАТ НДІ «Перетворювач» (м. Запоріжжя), який відповідає за своїм технічним рівнем кращим зарубіжним аналогам, а розроблені способи ідентифікації параметрів АД використані у ВАТ НДІ «Перетворювач» в конструкторській документації високовольтного ЧРАЕП нового покоління (з векторним керуванням).

Особистий внесок здобувача полягає в формулюванні мети та постановці задач дослідження, розробці математичних і імітаційних моделей ЧРАЕП, розробці і дослідженні запропонованих способів ідентифікації потокочеплень ротора та швидкості АД, енергозберігаючого керування високовольтним ЧРАЕП.

Апробація результатів дисертації. Результати дисертаційної роботи докладалися на міжнародних науково-технічних конференціях: «Електромеханічні системи, методи моделювання і оптимізації» (м. Кременчук, 2007 р., 2008 р., 2009 р.), «Силова електроніка і енергоефективність» (м. Алушта, 2007 р.), «Проблеми сучасної електротехніки» (м. Київ, 2008 р.), «Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика» (пмт. Миколаївка, 2008 р.).

Публікації. Результати дисертаційної роботи опубліковані в 15 друкованих наукових працях, з них: 13 – у фахових виданнях, 2 – патенти України, 3 – матеріали конференцій.

Структура й обсяг дисертації. Дисертація складається з вступу, п'яти розділів, висновку й додатків. Загальний об'єм роботи складає 191 сторінка, у тому числі 130 сторінок основного тексту, 59 рисунків, 9 таблиць, перелік використаних джерел (129 найменувань) і 5 додатків на 14 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність роботи, сформульовано мету та основні завдання дослідження, приведено загальну характеристику роботи, основні наукові положення і результати, що виносяться на захист.

У **першому розділі** на основі аналізу відомої вітчизняної і зарубіжної науково-технічної і патентної літератури визначені стан і тенденції розвитку: силових схем високовольтних ПЧ; принципів і підходів до створення керування ЧРАЕП, ідентифікації параметрів режиму і внутрішніх параметрів АД; досліджень ЕМП для ЧРАЕП великої потужності. Встановлені наступні особливості високовольтних ЧРАЕП в порівнянні з низьковольтними: низька частота комутації силових ключів інвертора і викликана цим істотна несинусоїдність форми

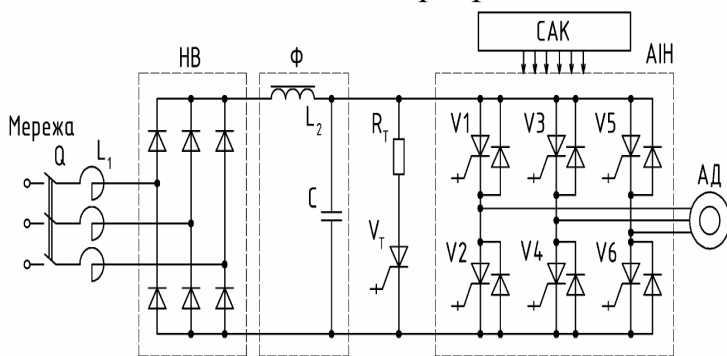


Рис. 1. Функціональна схема ЧРАЕП з дворівневим АИН-ШІМ

статорних струмів АД; відносно збільшені динамічні втрати в АИН і висока крутизна наростання статорного струму, викликані підвищеною амплітудою статорної напруги; збільшені значення постійних часу АД, що призводить до тривалих за часом ЕМП; збільшені абсолютні значення втрат потужності в ЕП.

У **другому розділі** з використанням методу узагальнених векторів розроблені математичні моделі високовольтного ЕП з дворівневим і трирівневим АИН-ШІМ (при дворівневому інверторі схема ЧРАЕП наведена на рис. 1), що враховують: ідеальне представлення АД і силових ключів перетворювача, несинусоїдальну форму вихідних

струмів і напруг ПЧ, дискретність перемикавання його силових ключів, а також – представлення кривої намагнічування АД арктангенціальною залежністю.

Створено комп'ютерні імітаційні моделі високовольтних ЧРАЕП, що складаються з: АД; ПЧ на основі дворівневого або триврівневого АІН-ШІМ; САК зі скалярним або векторним керуванням. Відхилення розрахункових даних від експериментальних не перевищувало 3–7% для електричних або 0,1–2% – для механічних процесів.

У третьому розділі на основі методу адаптивного керування з еталонною моделлю розроблений спосіб ідентифікації потокозчеплення ротора і швидкості короткозамкненого АД через його статорні напруги та струми, що характеризується (при незмінних значеннях активних опорів АД) функціональною схемою, наведеною на рис. 2. Характерною особливістю даного способу є обчислення в ньому за допомогою блоку датчиків ЕРС ротора БДЕ (що складається з датчиків проєкцій ЕРС ротора ДЕ1, ДЕ2) та обчислювачів напруги ОН1, ОН2 проєкцій $E_{r\alpha}, E_{r\beta}$ та $U_{r\alpha}, U_{r\beta}$ узагальнених векторів відповідно ЕРС та напруги ротора АД на осі нерухомої ортогональної системи (ОКС) « α – β »:

$$\left. \begin{aligned} E_{r\alpha} &= \frac{1}{k} \left[U_{s\alpha} - R_s I_{s\alpha} - L_\sigma \frac{dI_{s\alpha}}{dt} \right], & U_{r\alpha} &= E_{r\alpha} - kR_r I_{s\alpha}, \\ E_{r\beta} &= \frac{1}{k} \left[U_{s\beta} - R_s I_{s\beta} - L_\sigma \frac{dI_{s\beta}}{dt} \right], & U_{r\beta} &= E_{r\beta} - kR_r I_{s\beta} \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

де R_s та R_r – відповідно активні опори статорної та роторної обмоток АД; L_σ та k – відповідно сумарна індуктивність розсіяння і коефіцієнт зв'язку ротора АД; $I_{s\alpha}, I_{s\beta}$ – проєкції узагальненого вектора струму статора на осі ОКС « α – β ».

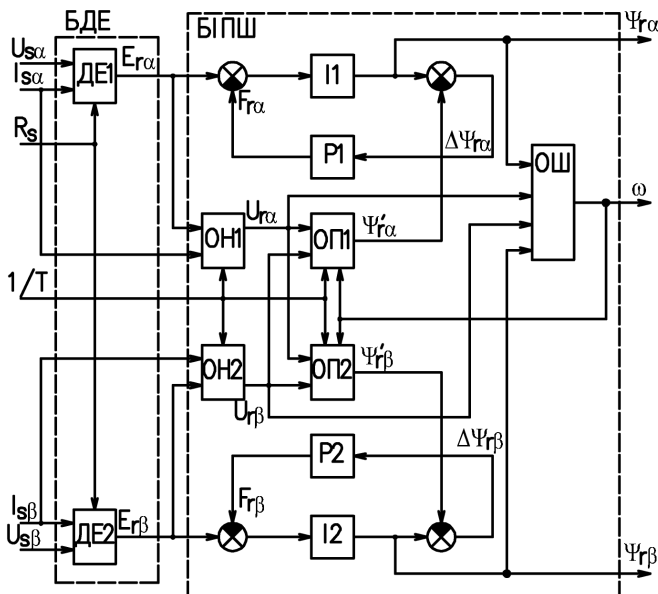


Рис. 2. Функціональна схема ідентифікації параметрів режиму АД

Шляхом інтегрування проєкцій $E_{r\alpha}, E_{r\beta}$ інтеграторами І1, І2 (у складі блоку ідентифікації потокозчеплень і швидкості БПШ) обчислюються значення проєкцій потокозчеплення ротора $\Psi_{r\alpha}, \Psi_{r\beta}$. Оцінні значення тих же проєкцій знаходяться обчислювачами потокозчеплень ОП1, ОП2:

$$\left. \begin{aligned} \Psi'_{r\alpha} &= \frac{z\omega U_{r\beta} - U_{r\alpha}/T}{(z\omega)^2 + (1/T)^2}, \\ \Psi'_{r\beta} &= -\frac{z\omega U_{r\alpha} + U_{r\beta}/T}{(z\omega)^2 + (1/T)^2} \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

де T , ω та z – електромагнітна постійна часу ротора, швидкість і число пар полюсів АД відповідно.

Сигнали різниці між обчисленими $\Psi_{r\alpha}, \Psi_{r\beta}$ і оцінними $\Psi'_{r\alpha}, \Psi'_{r\beta}$ значеннями проєкцій потокозчеплення ротора поступають на входи ПІ-регуляторів Р1 і

P2, на виході яких формуються коректуючі сигнали $F_{r\alpha}$ та $F_{r\beta}$. Визначення швидкості АД проводиться обчислювачем швидкості ОШ із співвідношення

$$\omega = (\Psi_{r\alpha} U_{r\beta} - \Psi_{r\beta} U_{r\alpha}) / z \Psi_r^2. \quad (3)$$

На рис. 3 наведена функціональна схема розробленого дисертантом способу ідентифікації потокозчеплень і швидкості АД при впливі температурної зміни його активних опорів, на якій використовуються наступні позначення: ООС і ООР – обчислювачі активних опорів відповідно статора і ротора АД; ОГФ1 і ОГФ2 – обчислювачі гармонійних функцій; ОЕ і ОС – обчислювачі уточнених значень відповідно проєкцій ЕРС ротора і опору статора; КП1–КП4 – координатні перетворювачі; ОМ1 і ОМ2 – обчислювачі модуля; І3 і І4 – інтегратори; Ф1 і Ф2 – фільтри; ДЧ – датчик частоти. За допомогою ОЕ знаходяться оцінні значення проєкцій ЕРС ротора $E'_{r\alpha}$, $E'_{r\beta}$ у вигляді

$$E'_{r\alpha} = -\omega_\Psi \Psi_{r\beta} \quad \text{та} \quad E'_{r\beta} = \omega_\Psi \Psi_{r\alpha}, \quad (4)$$

де кутова частота ω_Ψ обчислюється за допомогою ДЧ із співвідношення

$$\omega_\Psi = (\Psi_{r\alpha} E'_{r\beta} - \Psi_{r\beta} E'_{r\alpha}) / (\Psi_{r\alpha}^2 + \Psi_{r\beta}^2). \quad (5)$$

За допомогою КП1 і КП2 знаходяться уточнена E'_{rv} (не залежна від активного опору R_s , що ілюструється векторною діаграмою на рис. 4) і оцінна E'_{rv} проєкції узагальненого вектора ЕРС ротора на вісь v обертової ОКС « $u-v$ », орієнтованої дійсною віссю u за узагальненим вектором статорного струму \bar{I}_s .

З використанням коректуючого коефіцієнта ξ :

$$\xi = E'_{rv} / E'_{r\alpha} \quad (6)$$

визначаються уточнені значення $E_{r\alpha}^*$, $E_{r\beta}^*$ проєкцій ЕРС ротора АД:

$$E_{r\alpha}^* = \xi E_{r\alpha} \quad \text{та} \quad E_{r\beta}^* = \xi E_{r\beta}. \quad (7)$$

Активний опір статора визначається із залежності

$$R_s = \frac{1}{I_s} \left[\left(U_{s\alpha} - k E_{r\alpha}^* - L_\sigma \frac{dI_{s\alpha}}{dt} \right)^2 + \left(U_{s\beta} - k E_{r\beta}^* - L_\sigma \frac{dI_{s\beta}}{dt} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (8)$$

і використовується як уточнене значення для БДЕ.

Ідентифікація зворотного значення постійної часу T і активного опору R_r здійснюється із залежностей:

$$1/T = \int_0^{\tau_1} |E_{rx}| dt / \int_0^{\tau_1} |\Psi_r - L_m I_{sx}| dt \quad \text{та} \quad R_r = (L_m/k) \cdot (1/T), \quad (9)$$

де L_m – індуктивність намагнічування АД, а обчислення першого співвідношення в (9) здійснюється періодично по закінченню процесу інтегрування за інтервал часу $\tau_1 \approx 20$ мс.

Результати дослідження точності запропонованих способів ідентифікації: активних опорів статора R_s і ротора R_r , проєкцій потокозчеплень

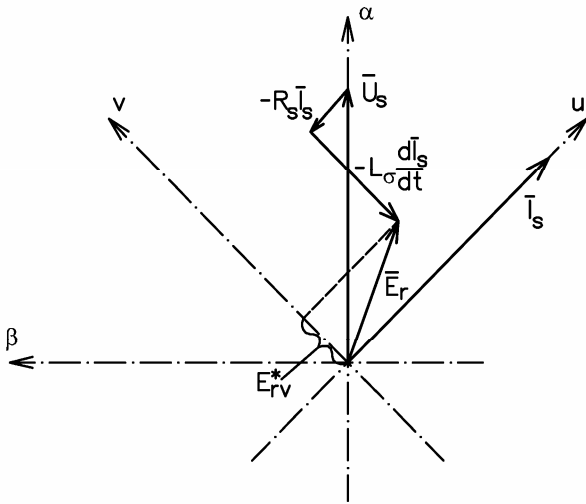


Рис. 4. Векторна діаграма АД

них векторів струму статора і потокозчеплення ротора АД; M – електромагнітний момент двигуна). На рис. 6 показана зміна опорів R_s і R_r обмоток статора і ротора, проєкцій потокозчеплення ротора $\Psi_{r\alpha}$ та $\Psi_{r\beta}$, швидкості ω при розгоні і в усталеному режимі роботи ЧРАЕП (на рис. 5 і рис. 6 фактичні значення параметрів двигуна показані суцільною лінією, а ідентифіковані – кружками). Перевірено функціонування запропонованих способів ідентифікації при насиченні магнітного кола двигуна (тобто при зміні модуля потокозчеплення ротора в діапазоні 1–1,2 від його номінального значення) та при дрейфі нуля датчиків струму та напруги у границях до $\pm 1\%$; при цьому похибки не перевищували: 0,3% – для проєкцій потокозчеплення ротора і 0,16% – для швидкості АД.

У четвертому розділі розглянуті питання підвищення енергоефективності високовольтного ЧРАЕП шляхом здійснення оптимального енергозберігаючого керування за мінімумом загальних втрат потужності ЕП. Для цього на *першому етапі* була розроблена математична модель загальних втрат потужності (ЗВП) в ЧРАЕП з АІН-ШІМ, що заснована на відомих залежностях та враховує насичення магнітного кола двигуна, несинусоїдальну форму статорних струмів та напруг АД, статичні і динамічні втрати потужності в ПЧ, а також основні і модуляційні втрати потужності в АД.

Таблиця 1.

Найменування параметрів, що ідентифікуються	Відносна похибка, %					
	для динамічних режимів		для усталених режимів при швидкості			
	розгону	гальмування	0	$0,1\omega_n$	$0,5\omega_n$	ω_n
опір R_s	1,4	1,4	1,5	1,5	1,2	0,7
опір R_r	2,4	2,4	2	2	1,7	1,2
проєкції $\Psi_{r\alpha}, \Psi_{r\beta}$	0,6	0,6	1,5	1,5	0,85	0,55
швидкість ω	0,6	0,6	0,15	0,1	0,01	0,01
гармонічні функції $\cos \theta_\Psi, \sin \theta_\Psi$	0,2	0,2	0,1	0,12	0,025	0,02

ротора $\Psi_{r\alpha}, \Psi_{r\beta}$, швидкості ω , гармонічних функцій $\cos \theta_\Psi, \sin \theta_\Psi$ (від аргументу узагальненого вектора потокозчеплення ротора), – для високовольтного ЧРАЕП в усталених і динамічних режимах (розгону, гальмування, набросу і збросу навантаження) наведені в табл. 1.

Діаграми ЕМП, отримані за допомогою імітаційного моделювання при початку розгону ЧРАЕП з векторною САК і запропонованими способами ідентифікації, представлені на рис. 5 (де I_s та Ψ_r – модулі узагальненого вектора потокозчеплення ротора).

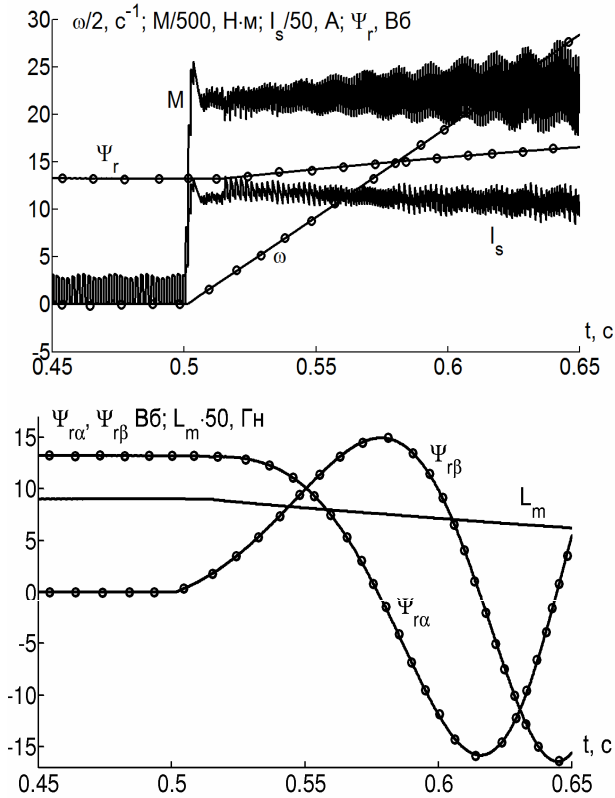


Рис. 5. ЕМП в режимі пуску АД

На *другому етапі* шляхом варіювання керуючих параметрів ЧРАЕП здійснена мінімізація його ЗВП. Для цього при варіюванні значень співвідношення амплітуди і частоти основної гармоніки напруги статора АД при незмінній модуляційній частоті інвертора на імітаційних моделях ЧРАЕП зі скалярним і векторним керуванням були розраховані ЕМП в ПЧ і АД. За даними розрахунку цих процесів на створеній моделі втрат потужності при незмінній модуляційній частоті визначалися ЗВП в ЧРАЕП, знаходилося їх мінімальне значення і відповідні йому оптимальні значення: відношення U_1^o/f_1 амплітуди першої гармоніки статорної напруги до її частоти та модуля Ψ_r^o потокозчеплення ротора АД. Після цього при вказаному оптимальному значенні U_1^o/f_1 (або Ψ_r^o) варіювалася модуляційна частота інвертора, при різних значеннях якої також розраховувалися ЕМП і ЗВП в ЧРАЕП, після чого визначалося мінімально можливе значення ЗВП для ЧРАЕП і відповідне йому оптимальне значення модуляційної частоти f_{II}^o інвертора. В результаті вказаної оптимізації отримані наступні апроксимуючі аналітичні залежності:

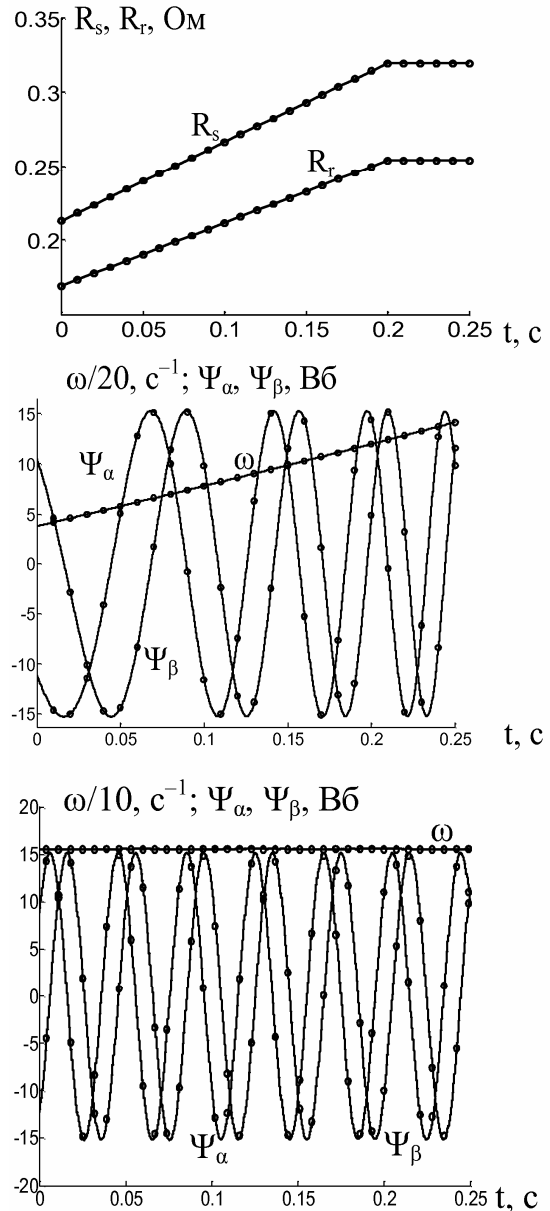


Рис. 6. Зміна параметрів АД: а – активних опорів; швидкості та проєкцій потокозчеплень ротора при розгоні (б) та усталеному режимі (в)

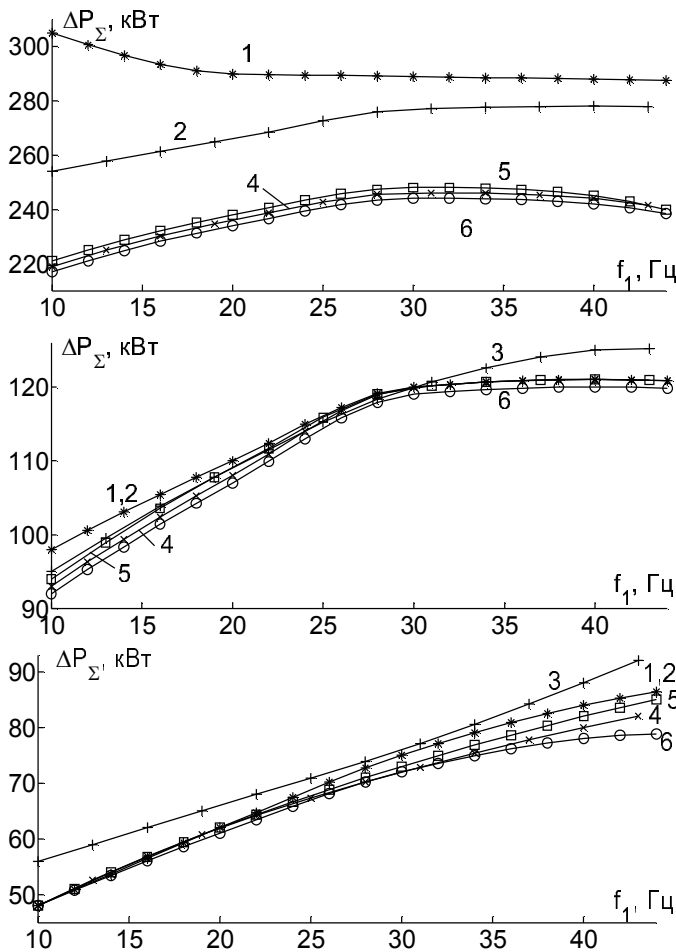


Рис. 7. Порівняння ЗВП для ЧРАЕП при різних законах частотного керування АД (1 – пропорціональному; 2 – при постійності потокозчеплення ротора; 3 – економічному, запропонованому М.П. Костенко; 4 – за мінімумом статорного струму; 5 – за мінімумом основних електромагнітних втрат потужності двигуна; 6 – за мінімумом ЗВП)

збільшується на 0,1–6% (що показано на рис. 8). Відмічене зменшення втрат потужності підтвержене експериментом.

У п'ятому розділі на першому етапі виконано порівняння якості регулювання ЕМП високовольтного ЧРАЕП при скалярному, квазівекторному і векторному (типу «Transvector» з явно вираженими модуляторами) керуванні при різних режимах роботи приводу. Враховуючи, що найкращу якість регулювання процесів забезпечує векторна САК, яка використовує запропоновані способи ідентифікації, пропонується використовувати її для високодинамічних високовольтних ЕП при будь-яких типах навантаження. Скалярна САК можлива до використання в нединамічних приводах з вентиляторним навантаженням.

На другому етапі запропоновано швидкодіюче обмеження статорних струмів АД при живленні його від дворівневого АІН-ШІМ, робота якого заснована на безпосередній (оминувши регулятори) дії на силові ключі інвертора

$$\frac{U_1^o/f_1}{U_{1H}/f_{1H}} = C_1 + C_2\sqrt{I_1} + C_3f_1^2, \quad (10)$$

$$\Psi_r^o = C_4 + C_5\sqrt{I_{sy}^*}, \quad (11)$$

$$f_{II}^o = C_6 + C_7\sqrt{I_1}, \quad (12)$$

що реалізують оптимальне за мінімумом ЗВП керування ЧРАЕП для скалярного і векторного керування (у яких із застосуванням методу найменших квадратів знайдені чисельні значення коефіцієнтів C_1 – C_7). Обчислені із залежностей (10)–(12) оптимальні керуючі параметри ЕП відрізняються від їх значень, розрахованих на моделі, не більш, ніж на 2,5%.

Здійснено порівняння запропонованого керування за мінімумом ЗВП в ЧРАЕП з відомими законами частотного керування АД, яке показано для різних моментів навантаження на рис. 7 (а – при $M_c=2M_n$; б – при $M_c=M_n$; в – при вентиляторному моменті навантаження) у функції частоти статора f_1 .

Встановлено, що при запропонованому керуванні та вентиляторному моменті навантаження приводу ЗВП в ЧРАЕП знижуються (порівняно з пропорційним законом частотного керування) на 5–30% і ККД

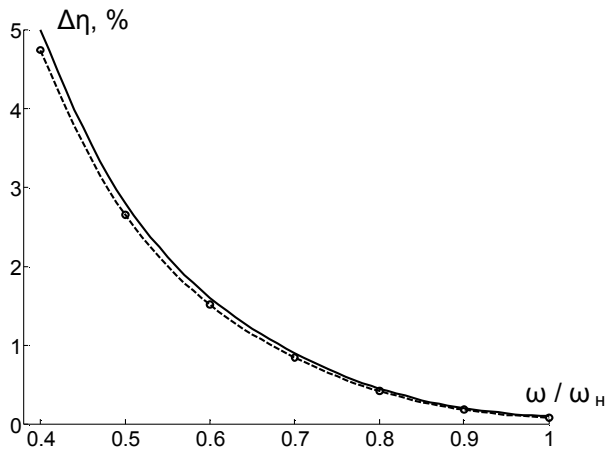


Рис. 8. Збільшення ККД електроприводу при переході від пропорційного закону до енергозберігаючого керування за мінімумом ЗВП (1 – розрахункове, 2 – експериментальне)

протилежною полярністю напруги. Це дозволяє досягти гранично можливої швидкодії і ефективного процесу обмеження статорного струму АД.

На *третьому етапі* розроблені структури скалярної та векторної САК, що здійснюють запропоноване енергозберігаюче (оптимальне за мінімумом ЗВП) керування, які наведені на рис. 10 і містять функціональні перетворювачі ФПІ–ФПЗ, що реалізують залежності (10)–(12). Причому для динамічних ЕП доцільним є використання енергозберігаючого керування лише в усталених режимах, а в перехідних режимах – керування при постійності потокозчеплення ротора асинхронного двигуна.

Результати дослідження ЧРАЕП з векторною САК і запропонованими способами ідентифікації (що характеризуються ЕМП, показаними на рис. 11) свідчать про досягнуту

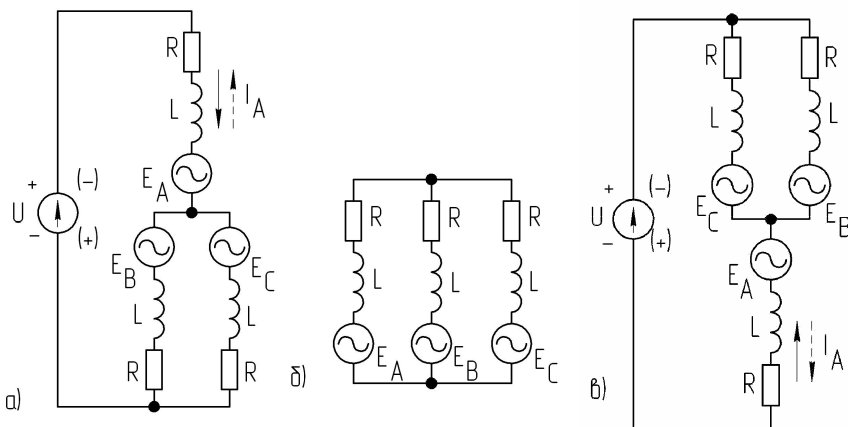


Рис. 9. Схеми заміщення статорних обмоток двигуна при живленні від дворівневого АІН-ШІМ: а – при вихідному провідному стані інвертора (наприклад, з відкритими силовими ключами V1, V4, V6); б – при вихідному непровідному стані інвертора (наприклад, з відкритими силовими ключами V2, V4, V6); в – після початку роботи запропонованого способу обмеження струму

і ілюструється на рис. 9 (де E_A, E_B, E_C – приведені до статора фазні ЕРС ротора АД; U_d – вхідна напруга інвертора). При перевищенні одним з фазних струмів інвертора (наприклад, струмом I_A у фазі А на рис. 9) допустимої для нього уставки примусово замикається силовий ключ даної фази інвертора, сполучений з полюсом інвертора, що має полярність напруги, протилежну до полярності поточного значення згаданого фазного струму; одночасно примусово замикається по одному силовому ключу в інших фазах інвертора до полюса інвертора з

протилежною полярністю напруги. Це дозволяє досягти гранично можливої швидкодії і ефективного процесу обмеження статорного струму АД. На *третьому етапі* розроблені структури скалярної та векторної САК, що здійснюють запропоноване енергозберігаюче (оптимальне за мінімумом ЗВП) керування, які наведені на рис. 10 і містять функціональні перетворювачі ФПІ–ФПЗ, що реалізують залежності (10)–(12). Причому для динамічних ЕП доцільним є використання енергозберігаючого керування лише в усталених режимах, а в перехідних режимах – керування при постійності потокозчеплення ротора асинхронного двигуна. Результати дослідження ЧРАЕП з векторною САК і запропонованими способами ідентифікації (що характеризуються ЕМП, показаними на рис. 11) свідчать про досягнуту високу якість регулювання цих процесів в динамічних і стаціонарних режимах в робочому діапазоні швидкостей і навантажень, яка задовольняє вимогам більшості загальнопромислових механізмів. При цьому точність регулювання швидкості в стаціонарних режимах визначається точністю розроблених

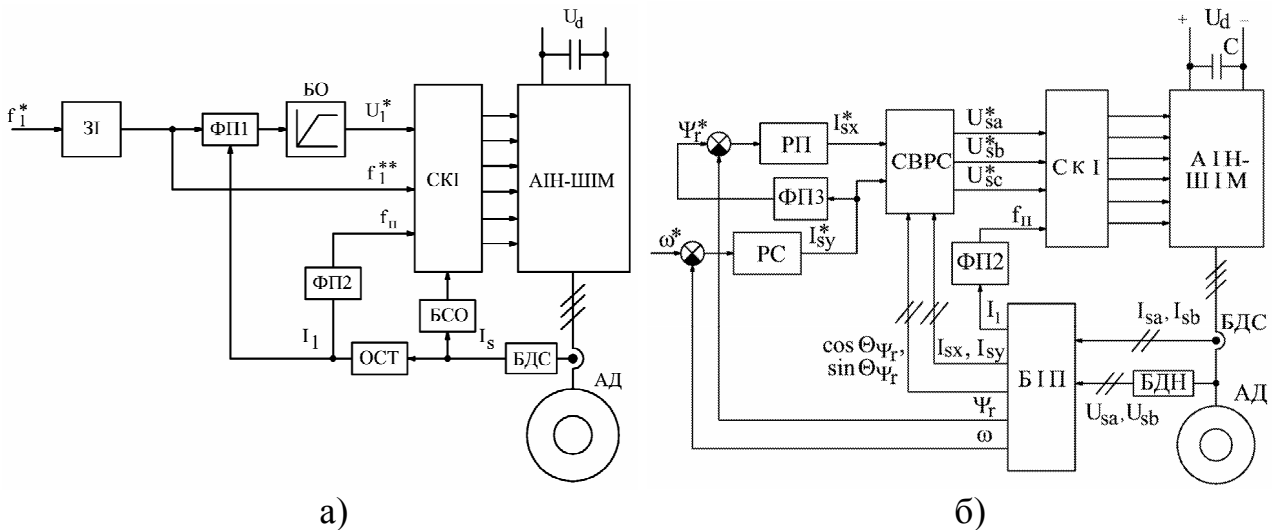


Рис. 10. Функціональні схеми енергозберігаючих скалярної (а) та векторної (б) САК (де ЗІ – задатчик інтенсивності, БО – блок обмеження, СКІ – система керування інвертором, БДС та БДН – блоки датчиків струму та напруги, БСО – блок струмообмеження, ОСТ – обчислювач основної гармоніки статорного струму, СВРС – система векторного регулювання струму, РП та РШ – регулятори потокозчеплення та швидкості)

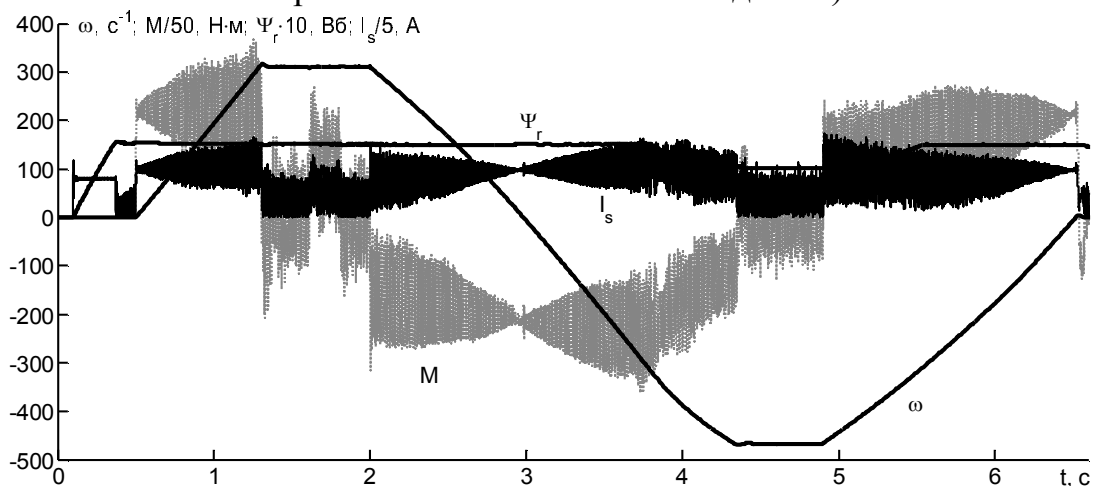


Рис. 11. ЕМП для режимів розгону, набросу і збросу номінального навантаження, реверсу та гальмування ЧРАЕП з векторним керуванням

способів ідентифікації і характеризується помилкою менше 0,15%. Також проведено дослідження ЧРАЕП з тривірневим АІН-ШИМ і запропонованими способами ідентифікації, результати якого характеризуються точністю регулювання, ідентичною з двірневим інвертором.

ВИСНОВКИ

Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою, в якій вирішена важлива наукова задача, яка полягає у підвищенні енергоефективності і точності регулювання координат високовольтного частотно-регульованого асинхронного електроприводу великої потужності, створеного на основі АІН-ШИМ без використання датчиків на валу двигуна.

1. Проведений аналіз існуючого стану систем автоматичного керування і способів ідентифікації параметрів ЧРАЕП з АІН-ШІМ виявив практичну неможливість їх використання у високовольтних електроприводах великої потужності внаслідок суттєво несинусоїдальної форми і збільшеної амплітуди пульсацій статорних струмів у таких електроприводах (що обумовлено зниженою частотою перемикання силових ключів високовольтного АІН-ШІМ, яка складає не більше 500–1000 Гц). При цьому спостерігається явна недостатність існуючих досліджень в частині електромеханічних процесів, загальних втрат потужності і енергозберігаючого керування для таких електроприводів.

2. Розроблені математична і імітаційна моделі високовольтного ЧРАЕП з АІН-ШІМ великої потужності враховують нелінійність кривої намагнічування і втрати в сталі двигуна, модуляційні втрати в двигуні і динамічні втрати в перетворювачі частоти, дискретний характер зміни і несинусоїдальну форму вихідної напруги і струмів перетворювача частоти, що дозволило розрахувати електромагнітні і електромеханічні процеси в даному електроприводі з відносною похибкою (у порівнянні з експериментом), що не перевищує: (3–7)% – для напруги і струмів або (0,1–2)% – для швидкості.

3. На основі розробленої уточненої методики розрахунку втрат потужності для ЧРАЕП з АІН-ШІМ (що вперше враховує модуляційні втрати в двигуні і динамічні втрати в перетворювачі частоти) запропоновано при векторному та скалярному регулюванні оптимальне енергозберігаюче керування за мінімумом загальних втрат потужності вказаного ЕП, використання якого дало додаткове зниження на (5–30)% загальних втрат потужності цього електроприводу і збільшення на (0,1–6)% його ККД.

4. За допомогою запропонованих способів ідентифікації для високовольтного ЧРАЕП з дворівневим і трирівневим АІН-ШІМ (які характеризуються низькою частотою комутації силових ключів і суттєво несинусоїдальною формою вихідних фазних струмів) досягнута висока точність непрямого (через фазні статорні напруги і струми двигуна) визначення: потокозчеплення ротора (з похибкою менше 0,6%) і швидкості (з похибкою, що не перевищує 0,15%), – в робочому діапазоні зміни швидкості (включаючи її нульове значення) і навантаження, а також – при насиченні магнітного кола двигуна та в робочому температурному діапазоні зміни активних опорів його статорної і роторної обмоток.

5. За допомогою запропонованих способів ідентифікації і відомих структур підпорядкованого регулювання у високовольтному ЧРАЕП з АІН-ШІМ при використанні векторної САК забезпечується нормована висока якість (відповідна стандартним типовим налаштуванням) електромеханічних процесів приводу: при одно- і двозонному регулюванні швидкості (у діапазоні швидкостей 1:100 вниз і 2:1 вгору від номінальної), а також – при позиційному керуванні.

6. Запропонований спосіб обмеження вихідних струмів трифазного АІН-ШІМ дозволив з гранично можливою швидкістю обмежувати вказані струми в стаціонарних і динамічних режимах і за рахунок цього – підвищити в цілому експлуатаційну надійність високовольтного ЧРАЕП великої потужності.

7. Достовірність отриманих наукових результатів підтверджена розрахунками на імітаційній моделі високовольтного ЧРАЕП великої потужності і про-

веденими експериментальними дослідженнями на дослідно-промисловому зразку даного електроприводу з перетворювачем частоти типу ПЧ-ТТП-200-6к-50 і двигуном типу 4АРМП потужністю 1600 кВт, напругою 6 кВ (відносно відхилення між розрахунковими і експериментальними даними не перевищує: (3–7)% – для напруги і струмів або (0,1–2)% – для швидкості), де менші значення відносяться до сталих, а більші – до динамічних режимів.

8. Результати дисертаційної роботи впроваджені у вигляді способів струмообмеження і енергозберігаючого керування електроприводом в дослідно-промисловому зразку високовольтного ЧРАЕП з АИН-ШИМ (з перетворювачем частоти типу ПЧ-ТТП-200-6к-50) зі скалярним керуванням, розробленому і виготовленому у ВАТ НДІ «Перетворювач» (м. Запоріжжя), а також у вигляді способів ідентифікації параметрів АД – в конструкторській документації високовольтного ЧРАЕП нового покоління з векторним керуванням, розробленому у ВАТ НДІ «Перетворювач», та рекомендуються для використання проектувальникам і службам експлуатації високовольтних ЧРАЕП.

ПУБЛИКАЦІЇ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Волков А.В. Быстродействующее ограничение выходных токов трехфазного АИН-ШИМ / А.В. Волков, Ю.С. Скалько // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск: Силова електроніка та енергоефективність. – К. – 2007. – Ч.3. – С.68-71.

2. Волков А.В. Высоковольтный частотно-регулируемый асинхронный электропривод / А.В. Волков, Ю.С. Скалько // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск: Проблеми сучасної електротехніки. – К. – 2008. – Ч.5. – С.27-30.

3. Волков А.В. Идентификация активных сопротивлений частотно-регулируемого асинхронного электродвигателя при их температурном дрейфе / А.В. Волков, Ю.С. Скалько // Електротехніка та електроенергетика. – Запоріжжя. – 2009. – №1. – С. 58-67.

4. Волков А.В. Идентификация потокосцепления ротора и скорости частотно-регулируемого асинхронного двигателя / А.В. Волков, Ю.С. Скалько // Вісник КДПУ. – Кременчук. – 2009. – Вип. 3 (56). – Ч. 2. – С.93-96.

5. Волков А.В. Исследование точности определения потокосцепления ротора и скорости двигателя в высоковольтном частотно-регулируемом асинхронном электроприводе без датчика скорости / А.В. Волков, Ю.С. Скалько // Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика. – Харків: НТУ «ХП». – 2008. – №30. – С.351-352.

6. Волков А.В. Математическая модель общих потерь мощности в частотно-регулируемом асинхронном электроприводе / А.В. Волков, Ю.С. Скалько // Електротехніка та електроенергетика. – Запоріжжя. – 2006. – №2. – С. 22-27.

7. Волков А.В. Оптимальное по минимуму общих потерь мощности управление частотно-регулируемым асинхронным электроприводом с АИН-ШИМ / А.В. Волков, Ю.С. Скалько // Електротехніка. – М. – 2008. – №9. – С.21-33.

8. Волков А.В. Потери мощности в системе: «автономный инвертор напряжения – асинхронный двигатель» / А.В. Волков, Ю.С. Скалько // Электромашинобудування та електрообладнання. Тематичний випуск: Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика. – Одеса. – 2006. – Вип. 66. – С.309-310.

9. Волков А.В. Цифровая модель частотно-регулируемого асинхронного электропривода со скалярным управлением / А.В. Волков, Ю.С. Скалько // Електротехніка та електроенергетика. – Запоріжжя. – 2005. – №2. – С. 75-81.

10. Волков А.В. Идентификация потокосцепления ротора и скорости асинхронного двигателя с учетом изменения его активных сопротивлений / А.В. Волков, Ю.С. Скалько // Электротехника. – М. – 2009. – №11. – С.2-12.

11. Скалько Ю.С. Сравнение электромеханических процессов для высоковольтного асинхронного электропривода со скалярным, квазивекторным и векторным принципами частотного управления / Ю.С. Скалько // Електротехніка та електроенергетика. – Запоріжжя. – 2008. – №1. – С. 24-31.

12. Пат. UA 39949 Україна, МПК(8) H02P21/00. Спосіб визначення потокозчеплень ротора й швидкості частотно-регульованого асинхронного двигуна / Волков О.В., Скалько Ю.С.; власник Запорізький національний технічний університет. – № U200809286; заявл. 16.07.2008; опубл. 25.03.2009, Бюл. № 6.

13. Пат. UA 20237 Україна, МПК(8) H02P27/04. Спосіб обмеження вихідних струмів трифазного мостового інвертора напруги з широтно-імпульсним регулюванням вихідної напруги, який живить двигун змінного струму / Волков О.В., Скалько Ю.С. ; власник Запорізький національний технічний університет. – № U200607944; заявл. 14.07.2006; опубл. 15.01.2007, Бюл. № 1.

14. Волков А.В. Энергосберегающее управление в частотно-регулируемом асинхронном электроприводе / А.В. Волков, Ю.С. Скалько // Матеріали Міжнародної науково-технічної конф. «Електромеханічні системи, методи моделювання та оптимізації», 15-17 травня 2007 р. – Вісник КДПУ. – Кременчук. – 2007. – Вип. 3 (44). – Ч. 2. – С. 103-106.

15. Волков А.В. Высоковольтный асинхронный электропривод с трехуровневым автономным инвертором напряжения / А.В. Волков, Ю.С. Скалько // Матеріали X ювілейної Міжнародної науково-технічної конф. «Електромеханічні системи, методи моделювання та оптимізації», 14-16 травня 2008 р. – Вісник КДПУ. – Кременчук. – 2008. – Вип. 4 (51). – Ч. 1. – С. 14-17.

Особистий внесок здобувача в роботах, що опубліковані в співавторстві, полягає: [9] – розробив імітаційну модель ЧРАЕП; [2, 4] – розробив і дослідив способи ідентифікації потокозчеплень і швидкості ротора АД; [3, 5, 10, 12] – запропонував і дослідив способи ідентифікації при температурній зміні активних опорів обмоток АД; [15] – дослідив запропоновані способи ідентифікації в ЧРАЕП з трирівневим АІН-ШІМ; [6, 8] – розробив математичну модель загальних втрат потужності в ЧРАЕП; [7, 14] – запропонував і дослідив енергозберігаюче керування ЧРАЕП, отримав аналітичні залежності для розрахунку оптимальних керуючих параметрів; [1, 13] – запропонував і дослідив швидкодіючий спосіб обмеження статорних струмів АД при його живленні від АІН-ШІМ.

АНОТАЦІЇ

Скалько Ю.С. Підвищення точності та енергоефективності високовольтного частотно-регульованого асинхронного електроприводу – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.03 – Електротехнічні комплекси і системи. – Державний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет». Дніпропетровськ, 2011.

У дисертації вирішена важлива наукова задача, яка полягає у підвищенні енергоефективності і точності регулювання координат високовольтного частотно-регульованого асинхронного електроприводу (ЧРАЕП) великої потужності, створеного на основі дворівневого або трирівневого АІН-ШІМ без використання датчиків на валу асинхронного двигуна (АД).

Розроблено математичний опис і імітаційна модель високовольтного ЧРАЕП, запропоновані способи ідентифікації параметрів режиму і внутрішніх параметрів високовольтного АД при живленні його від АІН-ШІМ.

Запропоновано оптимальне енергозберігаюче керування за мінімумом загальних втрат потужності для ЧРАЕП зі скалярним та векторним регулюванням, виконано порівняння вказаного енергозберігаючого керування з відомими законами частотного керування асинхронним двигуном, а також розроблений швидкодіючий спосіб обмеження вихідних струмів трифазного АІН-ШІМ.

Ключові слова: асинхронний електропривод, високовольтний перетворювач частоти, ідентифікація параметрів двигуна, енергозберігаюче керування.

Скалько Ю.С. Повышение точности и энергоэффективности высоковольтного частотно-регулируемого асинхронного электропривода – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы. – Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет». Днепропетровск, 2011.

В диссертации решена важная научная задача, которая состоит в повышении энергоэффективности и точности регулирования координат высоковольтного частотно-регулируемого асинхронного электропривода (ЧРАЭП) большой мощности, созданного на основе двухуровневого или трехуровневого АИН-ШИМ без использования датчиков на валу асинхронного двигателя (АД).

Разработаны математическое описание и имитационная модель ЧРАЭП, учитывающие дискретные свойства силовых ключей АИН-ШИМ, несинусоидальную форму его выходных напряжений и токов, а также нелинейность кривой намагничивания асинхронного двигателя.

Предложены способы идентификации параметров (скорости и потокосцепления ротора, активных сопротивлений статора и ротора) АД для высоковольтного ЧРАЭП с двухуровневым или трехуровневым АИН-ШИМ (для которых характерна низкая частота коммутации силовых ключей инвертора и существенно несинусоидальная форма выходных фазных токов). Посредством данных

способов достигнута высокая точность косвенного (через фазные статорные напряжения и токи двигателя) определения: потокосцепления ротора (с ошибкой менее 0,6%) и скорости (с погрешностью, не превышающей 0,15%), – в рабочем диапазоне изменения скорости (включая ее нулевое значение) и нагрузки АД, а также – при насыщении магнитной цепи двигателя и в рабочем диапазоне изменения температур статорной и роторной обмоток двигателя.

Разработана уточненная методика расчета общих потерь мощности для ЧРАЭП с АИН-ШИМ (учитывающая в том числе модуляционные потери в двигателе и динамические потери в преобразователе частоты). На основе рассчитанных на имитационной модели электромагнитных процессов в преобразователе частоты и двигателе с использованием данной методики выполнены расчеты общих потерь мощности для ЧРАЭП с АИН-ШИМ при варьировании соотношения между амплитудой и частотой основной гармоники фазного статорного напряжения, а также – при изменении модуляционной частоты инвертора.

Определены оптимальные значения указанных параметров, соответствующие минимуму общих потерь мощности в данном электроприводе при различных режимах его работы. Предложены аналитические зависимости для управляющих параметров ЧРАЭП, обеспечивающие при скалярном и векторном регулировании минимизацию общих потерь мощности указанного ЧРАЭП.

Выполнено сравнение предложенного оптимального по минимуму общих потерь мощности управления с существующими известными законами частотного управления АД (пропорциональным, при постоянстве потокосцепления ротора, экономичным законом М.П. Костенко, по минимуму статорного тока и минимуму основных электромагнитных потерь мощности двигателя). Установлено, что применение рассмотренного энергосберегающего управления в высоковольтном ЧРАЭП с вентиляторной нагрузкой приводит к снижению на (5–30)% его общих потерь мощности и увеличению на (0,1–6)% коэффициента его полезного действия.

Разработан способ ограничения выходных токов трехфазного АИН-ШИМ, который позволяет за счет непосредственного воздействия на силовые ключи инвертора предельно быстро ограничивать указанные токи в стационарных и динамических режимах, что повышает в целом эксплуатационную надежность высоковольтного ЧРАЭП большой мощности.

Достоверность полученных в диссертационной работе результатов подтверждена экспериментальными исследованиями на высоковольтном ЧРАЭП с преобразователем частоты типа ПЧ-ТТП-200-6к-50 с двигателем типа 4АРМП мощностью 1600 кВт и напряжением 6 кВ. Полученные результаты рекомендуются для использования проектировщикам и службам эксплуатации высоковольтных ЧРАЭП.

Ключевые слова: асинхронный электропривод, высоковольтный преобразователь частоты, идентификация параметров двигателя, энергосберегающее управление.

Skalko Yu.S. Precision and energy efficiency increase of high-voltage variable-frequency asynchronous electric drive – Manuscript.

Dissertation for acquiring candidate of technical sciences graduate degree on speciality 05.09.03 – Electrical complexes and systems. – State institution of higher education «National mining university». Dnipropetrovs'k, 2011.

Important scientific problem is solved in dissertation that consists in increasing of energy efficiency and coordinate control precision of high-voltage high-power variable-frequency asynchronous electrical drives (VFAED), created on the basis of two- or three-level VSI-PWM without the use of sensors on the motor shaft.

Mathematical description and simulation model of high-voltage VFAED is developed, the methods of mode and parameter identification of high-voltage induction motor feeding from VSI-PWM are offered.

An optimum energy-saving control on a minimum of power losses for VFAED with the scalar and vector regulation is offered, comparing of the indicated energy-saving control to the known laws of frequency induction motor control is executed, also the high-speed method of output currents limitation of three-phase VSI-PWM is developed.

Keywords: asynchronous electric drive, high-voltage frequency converter, motor parameter identification, energy-saving control.