

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«НАЦІОНАЛЬНИЙ ГІРНИЧИЙ УНІВЕРСИТЕТ»**

Косенко Ігор Олександрович

УДК 62-83-52:621.313.333.2

**УДОСКОНАЛЕННЯ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ
АСИНХРОННИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ З АВТОНОМНИМ
ІНВЕРТОРОМ СТРУМУ**

Спеціальність 05.09.03 – Електротехнічні комплекси та системи

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Дніпропетровськ – 2013

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі електропривода та автоматизації промислових установок Запорізького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник:

доктор технічних наук, професор
Волков Олександр Васильович,
завідувач кафедри гідроенергетики
Запорізької державної інженерної академії
Міністерства освіти і науки України.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор
Епштейн Ісаак Ізраїльович,
директор з науки корпорації
«Харківський електроштитовий завод-

Елетекс-С»;

кандидат технічних наук, доцент

Казачковський Микола Миколайович,
професор кафедри електропривода
Державного вищого навчального закладу
«Національний гірничий університет»
(м. Дніпропетровськ) Міністерства освіти і
науки України.

Захист відбудеться «__»_____ 2013 р. о _____ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.080.07 при Державному ВНЗ «Національний гірничий університет» (м. Дніпропетровськ) Міністерства освіти і науки України за адресою: 49005, м. Дніпропетровськ, просп. К. Маркса, 19.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Державного ВНЗ «Національний гірничий університет» Міністерства освіти і науки України за адресою: 49005, м. Дніпропетровськ, просп. К. Маркса, 19.

Автореферат розісланий «__»_____ 2013 р.

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

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Розробці автоматичного керування й дослідженню електромеханічних процесів для асинхронних електроприводів (АЕП) з автономним інвертором струму (АІС) присвятили свої роботи відомі вчені: Андрієнко П. Д., Волков О. В., Епштейн І. І. (Україна), Єфімов О. А., Шрейнер Р. Т. (Росія), Bose В. К., Leonhard W. (США), Wu В. (Канада), Номбу М., Неба У., Nonaka S. (Японія) та ін. Канадською фірмою Rockwell Automation розроблені й промислово випускаються асинхронні електроприводи на основі АІС з широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ) серії PowerFlex7000 потужністю від 150 до 4100 кВт і напругою від 2,4 до 6,9 кВ. На відміну від широко розповсюджених АЕП, виконаних на основі автономного інвертора напруги з ШІМ, для АЕП з АІС-ШІМ немає обмежень відносно довжини кабеля, що з'єднує асинхронний двигун (АД) з перетворювачем частоти, і не потрібно для надійної експлуатації даного АЕП застосування спеціального (з посиленою ізоляцією) двигуна. Однак широке поширення й промислове впровадження зазначених електроприводів (ЕП) на практиці стримується відносною складністю їхнього автоматичного керування й недостатністю існуючих досліджень у частині підвищення швидкодії, ефективного керування при провалах мережної напруги і поліпшення енергетичних показників. Дослідження даних питань і створення на їх основі вітчизняних швидкодіючих і економічних АЕП з АІС-ШІМ актуально й затребувано практикою в умовах України, на території якої присутній великий парк регульованих тиристорних електроприводів постійного струму (ТЕПС) і нерегульованих електроприводів з загальнопромисловими АД, який вимагає заміни на частотно-регульовані АЕП. Саме за рахунок впровадження АЕП з АІС-ШІМ з'являється можливість далі тривало експлуатувати загальнопромислові АД й зменшити капітальні витрати при переході від ТЕПС до АЕП з АІС-ШІМ, оскільки частина силових елементів (керований випрямляч з його системою керування, згладжуючий дросель, фільтрокомпенсуючий пристрій) з ТЕПС продовжує використовуватися в АЕП з АІС-ШІМ.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Основні результати дисертаційної роботи отримані автором у процесі його участі відповідальним виконавцем у роботах, пов'язаних зі створенням і впровадженням високоефективної техніки при виконанні держбюджетної науково-дослідної роботи відповідно до тематичного плану наукових досліджень Запорізького національного технічного університету за темою “Розробка та дослідження нових ефективних видів електропривода й енергозберігаючої перетворювальної техніки” (номер держреєстрації 0108U000274).

Мета роботи й завдання досліджень. Метою дисертаційної роботи є підвищення швидкодії та технічне спрощення автоматичного керування асинхронним електроприводом, виконаним на основі автономного інвертора струму з широтно-імпульсною модуляцією.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися такі основні завдання:

— розробка математичної й імітаційної (комп'ютерної) моделей АЕП з

АІС-ШІМ, призначених для дослідження електромагнітних і електромеханічних процесів, а також енергетичних показників у зазначеному електроприводі;

— одержання аналітичних залежностей, що описують у явному алгебраїчному вигляді зміну струму мережі й струму та напруги статора двигуна в асинхронному електроприводі з АІС-ШІМ на міжкомутаційному інтервалі силових ключів перетворювача частоти;

— удосконалення автоматичного керування АЕП з АІС-ШІМ, спрямоване на підвищення швидкодії регулювання й спрощення технічної реалізації керування;

— удосконалення керування активним випрямлячем струму, спрямоване на підвищення швидкодії регулювання реактивної складової струму мережі для асинхронного електропривода з АІС-ШІМ;

— кількісна і якісна оцінки досягнутих за допомогою запропонованого керування електромагнітних й електромеханічних процесів асинхронного електропривода з АІС-ШІМ та його енергетичних показників.

Об'єктом досліджень є електромагнітні й електромеханічні процеси, енергетичні показники АЕП з АІС-ШІМ, досягнуті при удосконаленому керуванні.

Предметом досліджень є способи автоматичного керування для АЕП з АІС-ШІМ.

Методи досліджень: метод узагальнених векторів й операторний метод, які використовуються при математичному описі електромагнітних процесів в АЕП з АІС-ШІМ та при його керуванні; методи прогнозуючого, релейного, підпорядкованого й полеорієнтованого керування, а також регулювання в обертовій координатній системі, які використовуються при розробці удосконаленого автоматичного керування АЕП з АІС-ШІМ; метод імітаційного моделювання, застосовуваний для кількісної і якісної оцінки регулювання ЕП та його енергетичних показників; метод експериментального дослідження, що служить для оцінки достовірності розробленої імітаційної моделі й отриманих результатів.

Наукові положення:

1. Якісне та спрощене за технічною реалізацією прогнозує векторне керування струмом статора асинхронного двигуна забезпечується завданням поточної комбінації силових ключів трифазного АІС-ШІМ, для якої модуль різниці між аргументами узагальнених векторів відхилення струму статора двигуна й вихідного струму інвертора є мінімальним.

2. Вибір поточної комбінації силових ключів трифазного АІС-ШІМ, що відповідає найменшому модулю різниці аргументів узагальнених векторів відхилення напруги статора асинхронного двигуна й прогнозує вектора струму, який знаходиться у вигляді різниці узагальнених векторів вихідного струму інвертора й струму статора двигуна, реалізує ефективне прогнозує векторне керування напругою статора двигуна.

3. Швидкодійою компенсація реактивної потужності асинхронного електропривода з АІС-ШІМ, обладнаного трифазним активним випрямлячем струму, здійснюється завданням поточної комбінації силових ключів останнього, яка

відповідає найменшому модулю різниці аргументів узагальнених векторів відхилення струму мережі й вхідного струму цього випрямляча.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Одержані для АЕП з АІС-ШІМ аналітичні залежності, які, на відміну від відомих, описують вперше в явному алгебраїчному вигляді поточні значення узагальненого вектора струму статора двигуна, дозволяють здійснити прогнозування приросту узагальненого вектора струму статора двигуна на міжкомутаційному інтервалі силових ключів інвертора.

2. Вперше отримані аналітичні співвідношення, за якими уточнено розраховуються поточні значення узагальнених векторів напруги статора двигуна при живленні від АІС-ШІМ та струму мережі асинхронного електропривода, обладнаного активним випрямлячем струму, дозволяють прогнозувати прирости зазначених узагальнених векторів на міжкомутаційних інтервалах силових ключів інвертора та активного випрямляча.

3. Розроблені структури автоматичного регулювання для АЕП з АІС-ШІМ, які ґрунтуються на запропонованих прогнозуючих векторних струмовому й напруговому керуванні інвертором, а також прогнозуючому керуванні активним випрямлячем струму, забезпечують високі динамічні властивості і поліпшені енергетичні показники зазначеного електропривода.

4. Розроблений для АЕП з АІС-ШІМ спосіб керування при провалах мережної напруги, що забезпечує примусове відкриття двох силових ключів в одній із фаз керованого (або активного) випрямляча при зниженні амплітуд фазних струмів мережі до нуля і обнулення активної складової струму статора, дозволяє запобігти виходам з ладу силових елементів перетворювача частоти в цих режимах і здійснити наступний швидкодіючий вихід електропривода на встановлений режим роботи після відновлення мережної напруги.

5. Вперше для АЕП з АІС-ШІМ отримані з використанням запропонованого автоматичного керування кількісна оцінка смуги пропускання за швидкістю й електромеханічні процеси відпрацювання положення в позиційному та слідкуючому режимах, встановлюють можливі широкі галузі застосування цього ЕП.

Практична цінність отриманих результатів:

— запропонований спосіб прогнозуючого векторного керування спрощує системи регулювання АЕП з АІС-ШІМ (шляхом спрощення прогнозуючих функціоналів, що реалізують частотно-струмове й частотно-напругове керування) і підвищує швидкодію регулювання струму статора та електромагнітного моменту АД (яка характеризується часом від 1,5 до 24 мс при відпрацюванні двократних значень зазначених параметрів у робочому діапазоні швидкостей АД);

— розроблений спосіб прогнозуючого векторного керування активним випрямлячем струму забезпечує, поряд зі спрощенням створених на його основі систем автоматичного регулювання (пов'язаним зі скороченням кількості застосовуваних датчиків електропривода), зменшення в 2,5 рази індуктивності згладжуючого дроселя і досягнення високої швидкодії відпрацювання заданих значень реактивної проекції вектора струму мережі (з часом менше 1 мс) й актив-

ної проекції вектора струму статора (з часом менше 17 мс), що дозволяє підтримувати (у сталих режимах при номінальному моменті навантаження в діапазоні швидкостей 1:10 від номінальної) високі значення мережного коефіцієнта потужності на рівні 0,98-0,99 і загальний коефіцієнт гармонік струму мережі, що дорівнює (4,7-18) %;

— система автоматичного керування (САК) асинхронним ЕП з АІС-ШІМ, яка створена на основі запропонованого прогноуючого частотно-напругового керування й підпорядкованого регулювання, забезпечує смугу пропускання за швидкістю до 85 Гц, а також високу нормовану якість регулювання швидкості (при одно- і двозонному керуванні) та положення (для позиційного й слідкуючого режимів), яка відповідає типовим налаштуванням систем підпорядкованого регулювання;

— розроблена система автоматичного керування при провалах мережної напруги виключає надструми і перенапруги на силових ключах перетворювача частоти та у двигуні (що запобігає виходу з ладу зазначених елементів у даних режимах) і забезпечує наступний швидкодіючий вихід електропривода на заданий режим роботи при відновленні мережної напруги;

— розроблена імітаційна (комп'ютерна) модель АЕП з АІС-ШІМ і запропонованим автоматичним керуванням з достатньою для інженерних завдань точністю (у динамічних режимах з похибкою: менше 7 % – для напруг і струмів або не більше 2 % – для швидкості) забезпечує розрахунок електромагнітних і електромеханічних процесів у зазначеному ЕП, що дозволяє використовувати цю модель як основний інструмент для дослідження розглянутого АЕП;

— результати дисертаційної роботи впроваджені у ВАТ НДІ “Перетворювач” в розробленій конструкторській документації на дослідний зразок АЕП з АІС-ШІМ напругою 6 кВ, потужністю 1600 кВт.

Особистий внесок здобувача складається у формулюванні мети й постановці завдань дослідження, розробці математичних і імітаційних моделей АЕП з АІС-ШІМ, розробці й дослідженні запропонованого автоматичного керування для АЕП з АІС-ШІМ, одержанні аналітичних залежностей, що забезпечують прогнозування зміни узагальнених векторів струму мережі, струму й напруги статора двигуна в АЕП з АІС-ШІМ, дослідженні електромагнітних і електромеханічних процесів, енергетичних показників, смуги пропускання за швидкістю для АЕП з АІС-ШІМ.

Апробація результатів дисертації. Результати дисертаційної роботи доповідалися на міжнародних науково-технічних конференціях: «Електромеханічні системи, методи моделювання та оптимізації» (Кременчук, 2007 – 2009 рр.), «Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика» (Кременчук, 2010 р.), «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика» (Алушта, 2007 р., 2009 р.; Миколаївка, 2008 р., 2012 р.; Кипарисне, 2010 р.; Одеса, 2011 р.), «Проблеми сучасної електротехніки» (Київ, 2008 р.), «Енергоефективність. Проблеми силової електроніки та електротехніки» (Київ, 2011 р.), «Электроприводы переменного тока» (Єкатеринбург, 2012 р.).

Публікації. Результати дисертаційної роботи опубліковані в 20 друкованих наукових працях, з них: 14 – у фахових виданнях, 3 – матеріали конференцій, 3 – патенти України.

Структура й обсяг дисертації. Дисертація складається з вступу, п'яти розділів, висновку й додатків. Загальний об'єм роботи становить 252 сторінки, у тому числі 149 сторінок основного тексту, 69 рисунків, 11 таблиць, перелік використаних джерел (117 найменувань) і 7 додатків на 48 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність роботи, сформульовані мета й завдання наукових досліджень, наведені дані про зв'язок роботи з науковими програмами, викладені наукові положення й наукова новизна отриманих результатів, практичне значення й реалізація результатів дисертаційних досліджень, надані відомості про їх публікацію, апробацію й впровадження.

У першому розділі з вітчизняної й закордонної науково-технічної літератури виконано аналіз існуючих силових схем АЕП з АІС-ШІМ, обладнаного керованим тиристорним випрямлячем (КВ) або активним випрямлячем струму (АВС), а також проведено аналіз відомого автоматичного керування ними. Визначено, що найбільш кращі силові схеми для створення загальнопромислового АЕП з АІС-ШІМ, обладнаного КВ або АВС, представлені на рис. 1. Ці схеми, у порівнянні з відомими схемами, характеризуються найбільшою простотою силових частини й найліпшими техніко-економічними показниками.

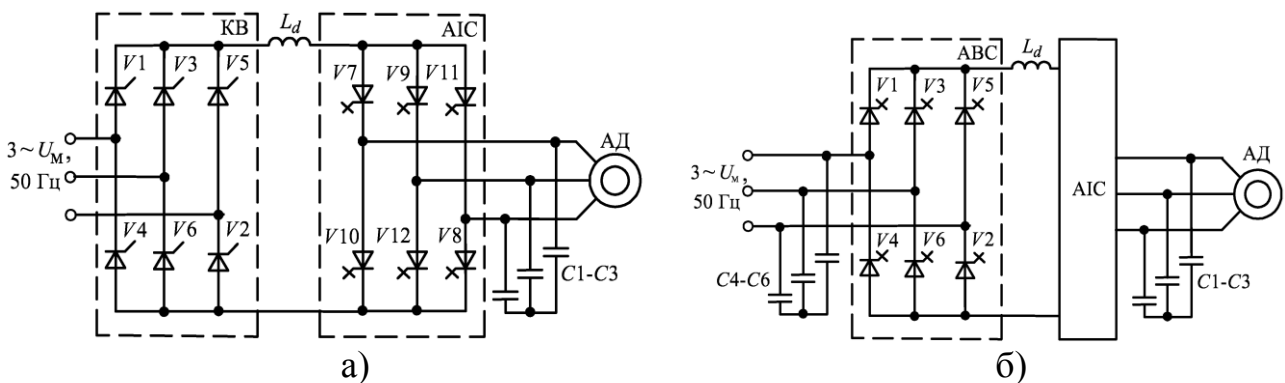


Рис. 1. Силові схеми АЕП з АІС-ШІМ, обладнаного: а) КВ; б) АВС

При цьому, як встановлено Р. Т. Шрейнером, найбільш перспективним способом автоматичного керування АЕП з АІС-ШІМ є прогнозує векторне керування, яке, на відміну від існуючих способів керування, одночасно: по-перше, ефективно виключає резонансні явища в електроприводі; по-друге, забезпечує нормовану високу якість регулювання електромеханічних процесів АЕП. Однак на сьогодні існуючі системи прогнозує векторного керування АЕП з АІС-ШІМ характеризуються складністю технічної реалізації і недостатньою швидкодією. На основі виконаних досліджень визначена мета і завдання дисертаційної роботи.

У другому розділі проаналізовані та обрані методи дослідження, які дозволяють при збереженні високої точності розрахунків значно спростити вико-

нання досліджень й аналізу електромеханічних процесів АЕП. Запропоновані математичні моделі АЕП з АІС-ШІМ, обладнаного КВ або АВС, які складені в узагальнених векторах, дозволяють виключити матричні обчислення при визначенні вхідних й вихідних електричних параметрів інвертора і випрямляча та спростити форму запису рівнянь, що описують АІС й АВС. Розроблені імітаційні (комп'ютерні) моделі АЕП з АІС-ШІМ, обладнаного КВ та АВС, з запропонованими системами частотно-струмового і частотно-напругового способів керування, які враховують несинусоїдальну форму вхідних і вихідних фазних струмів і напруг перетворювача частоти, дискретність (що дорівнює 20 мкс) цифрового керування та перемикання його силових ключів. Імітаційні моделі розглянутого АЕП, обладнаного КВ або АВС, містять: асинхронний двигун типу 4А132S6У3 потужністю 5,5 кВт; конденсатори $C1-C6$ однакової ємності, що дорівнює 50 мкФ; згладжуючий дросель L_d з індуктивністю 0,075 Гн або 0,03 Гн. Достовірність розроблених імітаційних моделей підтверджена експериментальними дослідженнями на макетному зразку АЕП, обладнаного КВ або АВС, напругою 380 В й потужністю 5,5 кВт. Відмінність розрахункових результатів від експериментальних не перевищує: 5–7% – для миттєвих значень струмів і напруг та 1–2% – для швидкості й мережного коефіцієнта потужності (де менші значення відповідають сталим, а більші – перехідним режимам).

У третьому розділі за допомогою розроблених схем заміщення АЕП з АІС-ШІМ, обладнаного КВ, для довільного міжкомутаційного інтервалу (МІ) силових ключів інвертора складено опис електромагнітних процесів (ЕМП) у системі “інвертор струму – двигун”. При цьому під МІ розуміється інтервал часу між сусідніми комутаціями силових ключів АІС. Із застосуванням операторного методу отримані для АЕП з АІС-ШІМ аналітичні залежності для розрахунку узагальнених векторів струму $\bar{I}_s(\tau)$ й напруги $\bar{U}_s(\tau)$ статора АД у вигляді:

$$\bar{I}_s(\tau) = \lambda_1 \bar{I}(0) + \lambda_2 \bar{I}_s(0) + \lambda_3 \bar{U}_k(0) + \lambda_4 \bar{E}_r(0), \quad (1)$$

$$\bar{U}_s(\tau) = \lambda_5 \bar{I}(0) + \lambda_6 \bar{I}_s(0) + \lambda_7 \bar{U}_k(0) + \lambda_8 \bar{E}_r(0), \quad (2)$$

де $\bar{I}(0)$, $\bar{I}_s(0)$, $\bar{U}_k(0)$ й $\bar{E}_r(0)$ – початкові (для моменту часу $\tau=0$ початку довільного МІ) значення узагальнених векторів відповідно вихідного струму АІС, струму статора АД, напруги на конденсаторах $C1-C3$ і приведені до статора електрорушійної сили (ЕРС) ротора; $\lambda_1 - \lambda_8$ – коефіцієнти, що залежать від внутрішніх параметрів елементів силового кола АЕП (активних й індуктивних опорів статорного кола АД, ємностей конденсаторів $C1-C3$) і поточної тривалості τ МІ (яка відраховується від початку розглядуваного МІ).

За цими залежностями у нерухомій ортогональній координатній системі (ОКС) “ $\alpha - \beta$ ” (що орієнтована віссю “ α ” за геометричною віссю фази “а” статорної обмотки двигуна) побудовані для одного довільного МІ інвертора годографи зміни узагальнених векторів струму $\bar{I}_s(\tau)$ й напруги $\bar{U}_s(\tau)$ статора, а також векторів їх прирістів $\Delta \bar{I}_s(\tau)$ і $\Delta \bar{U}_s(\tau)$. Аналіз розрахованих годографів показав, що траєкторія руху вектора прирісту струму статора $\Delta \bar{I}_s(\tau)$ близько збігається з напрямком поточного вектора вихідного струму \bar{I} інвертора, а траєк-

торія руху вектора прирісту напруги статора $\Delta \bar{U}_s(\tau)$ – з напрямком прогнозуючого вектора напруги $\bar{U}_\Sigma(\tau)$, який обчислюється у вигляді суми двох перших доданків із залежності (2). Виходячи з проведеного аналізу запропоновано здійснювати прогнозування напрямку зміни вектора прирісту $\Delta \bar{I}_s(\tau)$ струму статора двигуна на довільному МІ інвертора за напрямком поточного узагальненого вектора вихідного струму \bar{I} АІС, а вектора прирісту $\Delta \bar{U}_s(\tau)$ напруги статора двигуна – за напрямком прогнозуючого вектора напруги $\bar{U}_\Sigma(\tau)$. При цьому додатково проведеними дослідженнями встановлено, що при зазначеному прогнозуванні вектор напруги $\bar{U}_\Sigma(\tau)$ може бути замінений вектором прогнозуючого струму $\bar{I}_\Sigma(\tau)$, що розраховується у вигляді різниці узагальнених векторів вихідного струму АІС і струму статора двигуна (що дозволяє значно скоротити математичні обчислення при прогнозуванні).

На підставі вищевикладеного розроблені прогнозуючі векторні системи регулювання струму і напруги двигуна (СРСД й СРНД відповідно), що показані пунктиром на рис. 2 та рис. 3. Також на рис. 2 показана штрих-пунктиром узагальнена схема САК асинхронним ЕП, обладнаним КВ, для частотно-струмового (при використанні системи СРСД) і частотно-напругового (при застосуванні системи СРНД замість СРСД) способів керування. Схеми на рис. 2 і

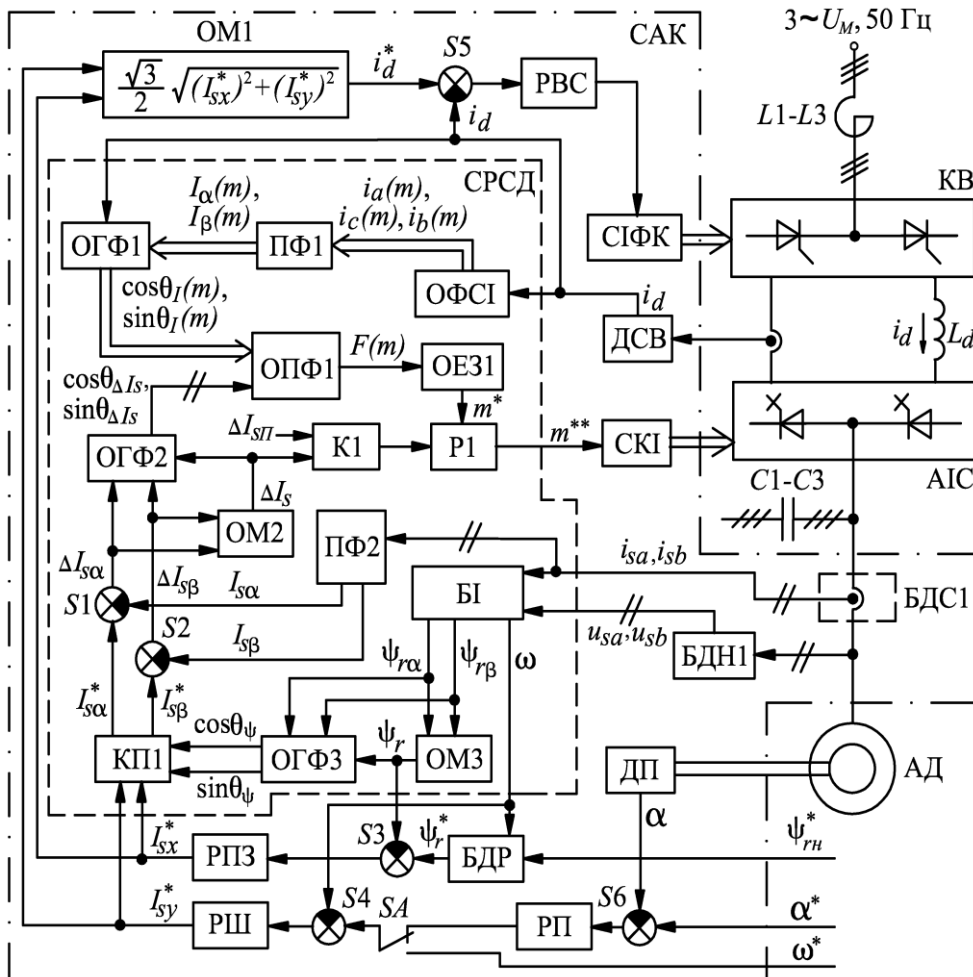


Рис. 2. Схема САК з СРСД

рис. 3 містять: систему імпульсно-фазового керування СІФК; регулятор випрямленого струму РВС; обчислювачі модуля ОМ1 – ОМ4; обчислювачі гармонійних функцій ОГФ1 – ОГФ5; перетворювачі фаз ПФ1 – ПФ3; обчислювач фазних струмів інвертора ОФСІ; блоки датчиків напруги БДН1 і струму БДС1; датчик струму випрямляча ДСВ; обчислювачі прогно-

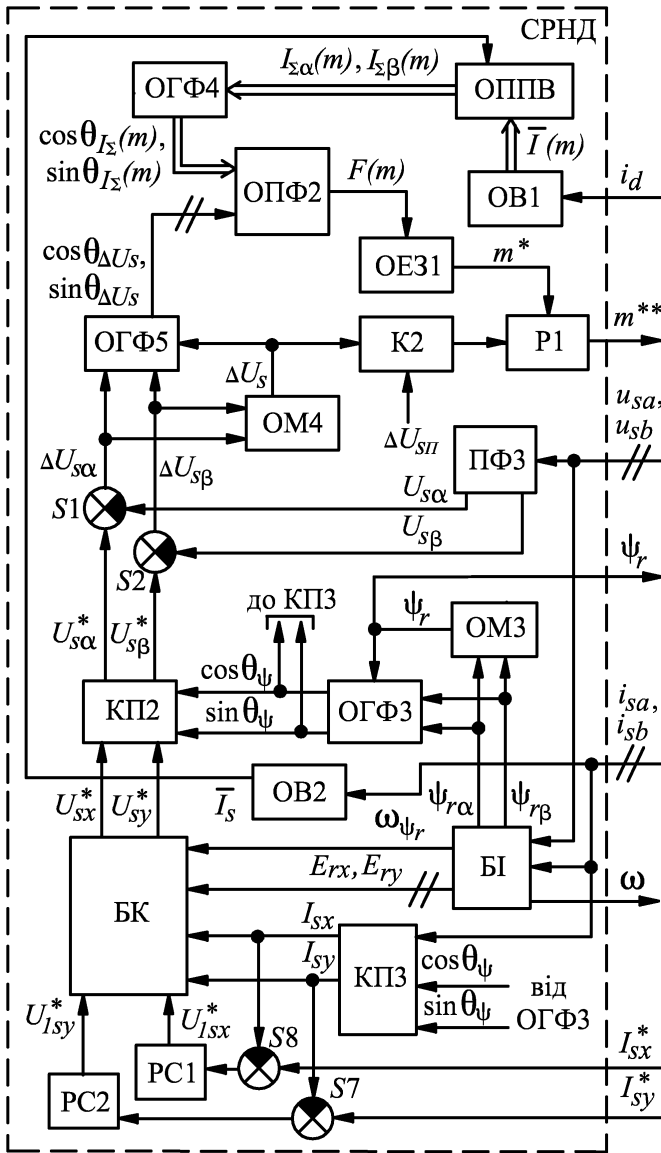


Рис. 3. Схема СРНД

струму $\bar{I}(m)$ АІС. У схемі САК з системою СРНД на рис. 3 з всіх можливих комбінацій $m = 1, 2, \dots, 6$ станів силових ключів інвертора задається така їх комбінація m^* , яка відповідає виконанню співвідношення:

$$|\theta_{\Delta U_s} - \theta_{I_\Sigma}(m)| = \min, \quad (4)$$

де $\theta_{\Delta U_s}$ й $\theta_{I_\Sigma}(m)$ – відповідно аргументи узагальнених векторів відхилення напруги статора $\Delta \bar{U}_s$ й прогнозованого вектора струму $\bar{I}_\Sigma(m)$.

Для АЕП з АІС-ШІМ, обладнаного КВ і прогнозуючою САК (з системою СРСД або СРНД), досліджені ЕМП, енергетичні показники й параметри швидкодії. Результати частини цих досліджень наведені на рис. 4 і рис. 5. Зокрема, на рис. 4 показані перехідні ЕМП для наступних режимів роботи АЕП: розгону до номінальної швидкості ω_n двигуна, накиду й скидання номінального навантаження, реверса до півторакратно від номінального значення швидкості АД, гальмування до нульової швидкості, де I_s , Ψ_r , M и ω – модулі узагальнених векторів струму статора й потокозчеплення ротора, електромагнітний момент і кутова швидкість АД відповідно.

зуючих функціоналів ОПФ1 і ОПФ2; обчислювач екстремального значення ОЕЗ1; регістр Р1; компаратори К1 і К2; систему керування інвертором СКІ; координатні перетворювачі КП1 – КП3; блоки ідентифікації БІ й двозонного регулювання БДР; регулятори потокозчеплення РПЗ, швидкості РШ і положення РП; датчик положення ДП; перемикач SA; суматори S1-S8; обчислювач проєкцій прогнозованих векторів ОППВ; обчислювачі узагальнених векторів ОБ1 і ОБ2; блок компенсації БК; регулятори струму РС1 і РС2.

У схемі САК з системою СРСД на рис. 2 з всіх можливих комбінацій $m = 1, 2, \dots, 6$ станів силових ключів інвертора задається така їх комбінація m^* , що відповідає умові:

$$|\theta_{\Delta U_s} - \theta_I(m)| = \min, \quad (3)$$

де $\theta_{\Delta U_s}$ й $\theta_I(m) = \pi(2m - 1)/6$ – відповідно аргументи узагальнених векторів відхилення струму статора $\Delta \bar{U}_s$ й прогнозованого вихідного

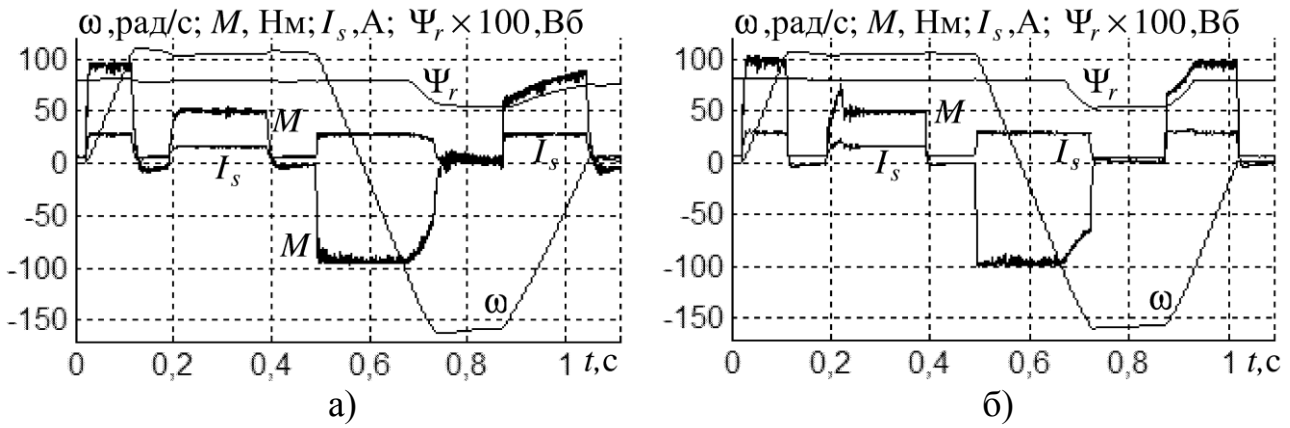


Рис. 4. Перехідні ЕМП: а – для САК з СРСД; б – для САК з СРНД

На рис. 5 наведено графік відношення амплітуд фактичного ω_M й заданого ω_M^* (у вигляді гармонійного сигналу із частотою f) значень швидкості АД від згаданої частоти f . При цьому визначена смуга пропускання за швидкістю у вигляді граничного значення для діапазону частот f , при якому розглянуте відношення амплітуд ω_M/ω_M^*

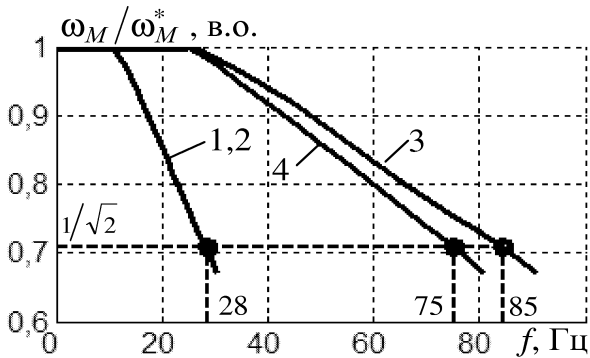


Рис. 5. Полоса пропускання: 1, 2 – для САК з СРСД; 3, 4 – для САК з СРНД (1, 3 – при $\omega = 0$; 2, 4 – при $\omega = 0,9\omega_n$)

У четвертому розділі досліджені ЕМП у системі “трифазна мережа живлення – АВС”. При застосуванні методу узагальнених векторів отримані залежності для розрахунку (на довільному МІ силових ключів АВС) вектора струму мережі \bar{I}_ϕ :

$$\bar{I}_\phi(\tau') = \delta_1 \bar{I}_n(0) + \delta_2 \bar{I}_\phi(0) + \delta_3 \bar{U}'_\kappa(0) + \delta_4 \bar{U}_\phi(0), \quad (5)$$

де $\bar{I}_n(0)$, $\bar{I}_\phi(0)$, $\bar{U}'_\kappa(0)$ і $\bar{U}_\phi(0)$ – початкові (для моменту часу $\tau' = 0$ початку довільного МІ силових ключів випрямляча) значення узагальнених векторів вхідного струму АВС, струму мережі, напруги на конденсаторах С4–С6 і мережної напруги відповідно; $\delta_1 - \delta_4$ – коефіцієнти, що залежать від внутрішніх параметрів елементів силового кола (активних і індуктивних опорів, а також ємностей конденсаторів С4–С6) і поточної тривалості τ' МІ випрямляча (який відраховується від початку і протягом розглядуваного МІ).

Для довільного одного МІ випрямляча в нерухомій ОКС “ $\alpha - \beta$ ” (що орієнтована віссю “ α ” за геометричною віссю фази “а” силового трансформатора)

виконано розрахунок годографів зміни узагальнених векторів струму мережі і його складових. Аналіз розрахованих годографів показав, що напрямок зміни приросту $\Delta \bar{I}_\phi(\tau') = \bar{I}_\phi(\tau') - \bar{I}_\phi(0)$ узагальненого вектора струму мережі $\bar{I}_\phi(\tau')$ визначається практично лише першим доданком із (5), який залежить від початкового значення (на розглядуваному МІ) вектора вхідного струму $\bar{I}_n(0)$ випрямляча. Виходячи із цього, запропоновано прогнозувати напрямок зміни вектора приросту $\Delta \bar{I}_\phi(\tau')$ струму мережі на довільному МІ випрямляча за напрямком зазначеного узагальненого вектора вхідного струму $\bar{I}_n(0)$ АВС.

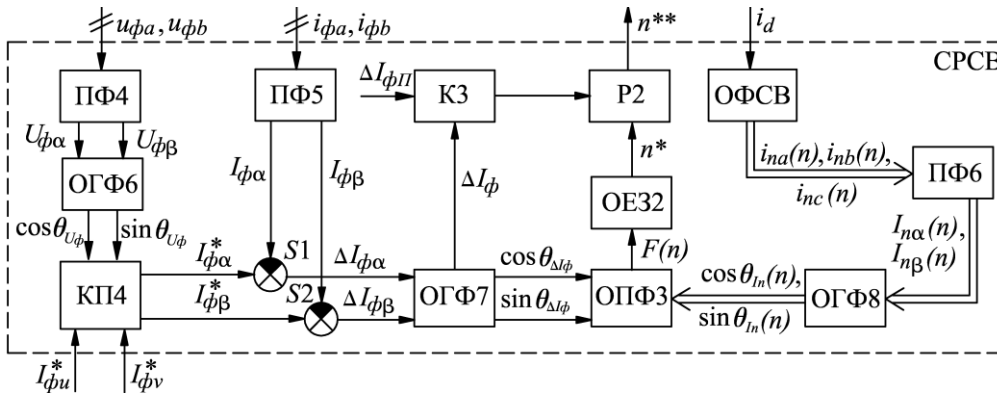


Рис. 6. Схема СРСВ

На підставі викладеного прогнозування розроблена векторна система регулювання струму випрямляча (СРСВ), наведена на рис. 6. Вона містить: перетворювачі фаз ПФ4 – ПФ6; координатний перетворювач КП4; обчислювачі гармонійних функцій ОГФ6 – ОГФ8; компаратор КЗ; регістр Р2; обчислювач прогнозного функціонала ОПФ3; обчислювач екстремального значення ОЕЗ2; обчислювач фазних струмів випрямляча ОФСВ; суматори S1, S2.

Системою СРСВ з всіх робочих комбінацій $n = 1, 2, \dots, 6$ станів силових ключів АВС задається комбінація n^* , яка відповідає умові:

$$|\theta_{\Delta I_\phi} - \theta_{I_n(n)}| = \min, \quad (6)$$

де $\theta_{\Delta I_\phi}$ й $\theta_{I_n(n)} = \pi(2n - 1)/6$ – аргументи узагальнених векторів відповідно відхилення струму мережі $\Delta \bar{I}_\phi$ й прогнозованого вхідного струму $\bar{I}_n(n)$ АВС.

З використанням СРСВ на рис. 7 запропонована САК для АЕП з АІС-ШІМ, обладнаного АВС, яка містить (крім блоків з рис. 2 і рис. 3): мережний фільтр МФ; обчислювач модуля ОМ5; множно-ділильний блок МДБ; систему керування випрямлячем СКВ; датчик вхідної напруги ДН інвертора; блоки датчиків напруги БДН2 і струму БДС2; суматори S1-S5.

Для АЕП з АІС, обладнаного АВС, були виконані розрахунки ЕМП, енергетичних показників і параметрів швидкодії. Зокрема, на рис. 8 показані перехідні ЕМП при $L_d = 0,03$ Гн для наступних режимів роботи АЕП: розгону до номінальної швидкості двигуна, послідовного накиду спочатку двигунового, а потім – генераторного номінального навантаження, скидання цього навантаження, реверса до половинного від номінального значення швидкості АД, гальмування до нульової швидкості. У табл. 1 показані розраховані значення енергетичних показників для АЕП з АІС-ШІМ при $L_d = 0,075$ Гн і застосуванні двох розгляну-

Проведеними дослідженнями встановлено, що зниження індуктивності згладжуючого дроселя в 2,5 рази (від 0,075 до значення 0,03 Гн) дозволяє збільшити більш, ніж в 1,7 рази (з 30 до 17 мс), швидкодію відпрацювання активної складової вектора струму статора двигуна й більш, ніж в 1,9 рази (з 31 Гц до 60 Гц), – смугу пропускання за швидкістю.

Також встановлено, що розроблені системи прогноуючого керування струмом мережі, струмом і напругою статора двигуна не чуттєві до температурної зміни внутрішніх параметрів елементів силового кола АЕП (активних опорів резисторів і ємностей конденсаторів).

У п'ятому розділі розроблено автоматичне керування для АЕП з АІС-ШІМ, обладнаного КВ або АВС, що забезпечує безаварійну роботу ЕП при провалі мережної напруги і її наступному відновленні. При запропонованому керуванні здійснюється обнулення заданого значення активної проекції I_{sy}^* вектора струму статора двигуна ($I_{sy}^* = 0$), а у випадку провалу мережної напруги до нульового значення (зокрема, при відключенні вхідного вимикача електропривода) – примусово відкриваються два силові ключі (в анодній і катодній групах) однієї з фаз випрямляча. Це дозволяє в цьому режимі витратити енергію, запасену в згладжуючому дроселі L_d , головним чином на підтримку поточозчеплення ротора двигуна й сприяє зменшенню часу наступного виходу АЕП на заданий режим роботи після відновлення мережної напруги. Згадане відкривання в одній із фаз випрямляча двох силових ключів виключає обрив струму в ланці постійного струму АЕП і запобігає викликані цим (з урахуванням великої індуктивності дроселя L_d) аварійні перенапруги на силових ключах випрямля-

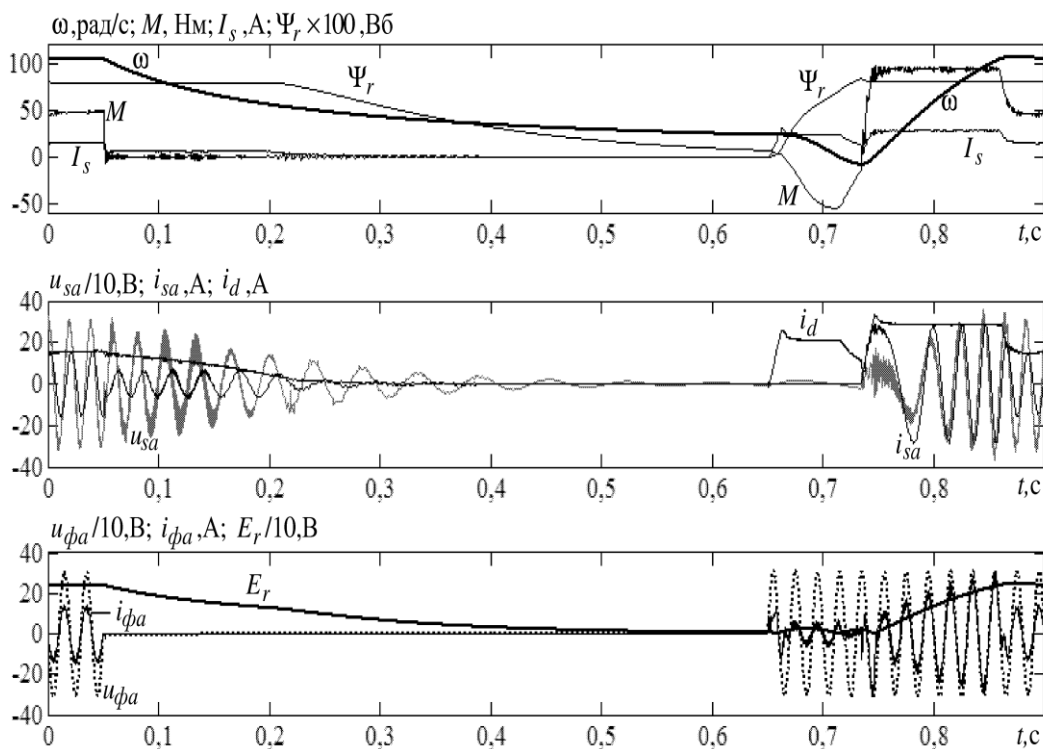


Рис. 9. Перехідні ЕМП при провалі мережної напруги тривалістю 0,6 с

ча й інвертора. На рис. 9 наведені графіки, що ілюструють ЕМП для АЕП з АІС-ШІМ, обладнаного АВС, при провалі (у момент часу $t=0,05$ с) мережної напруги до нульового значення (спричиненому відключенням автоматичного вимикача

на вході перетворювача частоти) і її відновленні (у момент часу $t=0,65\text{с}$) з наступним здійсненням автоматичного повторного включення.

На рис. 9 прийняті наступні позначення: u_{sa} і i_{sa} – фазні напруга й струм статора двигуна; i_d і E_r – відповідно вихідний струм АВС і модуль узагальненого вектора приведенної до статора ЕРС ротора; $u_{\phi a}$ і $i_{\phi a}$ – фазні напруга й струм мережі.

ВИСНОВКИ

Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою, в якій вирішена важлива наукова задача, яка полягає в розробці і науковому обґрунтуванні ефективних способів прогнозуючого векторного керування та створенні на їх основі спрощених структур автоматичного регулювання для асинхронного електропривода з АІС-ШІМ, які забезпечують швидкодіюче керування електромеханічними процесами та поліпшенні енергетичні показники зазначеного електропривода.

Основні наукові результати, висновки і практичні рекомендації дисертаційної роботи полягають у наступному:

1. З аналізу науково-технічної літератури встановлені недостатність існуючих досліджень і ефективності відомого автоматичного керування АЕП з АІС-ШІМ, а також практична затребуваність його вдосконалювання в частині: спрощення технічної реалізації й підвищення швидкодії векторного керування двигуном і активним випрямлячем, оцінки смуги пропускання за швидкістю і якості регулювання положення для зазначеного ЕП, керування цим електроприводом при провалах мережної напруги та поліпшення його енергетичних показників.

2. Розроблена імітаційна модель АЕП з АІС-ШІМ враховує фактичну форму вхідних і вихідних напруг і струмів керованого (або активного) випрямляча й автономного інвертора струму, електромагнітні й механічні процеси, які протікають в двигуні, електромагнітні процеси в перетворювачі частоти, дискретність (рівну 20 мкс) автоматичного керування цим електроприводом і характеризується достатнім для інженерних задач збігом з експериментом (з відмінністю: менше 5-7% – для напруг і струмів або не більше 1-2% – для швидкості, де менші значення відносяться до сталих, а більші – до динамічних режимів).

3. Запропоновані способи прогнозуючого векторного керування струмами й напругами статору для АЕП з АІС-ШІМ характеризуються нечутливістю до температурної зміни активних опорів двигуна і ємностей конденсаторів перетворювача частоти й дозволяють при спрощенні технічної реалізації векторного керування досягти високої швидкодії відпрацювання струму статора й електромагнітного моменту АД (з часом регулювання менше 6 – 24 мс при відпрацюванні двократних значень зазначених параметрів, де найбільші значення відносяться до номінальної, а найменші – до нульової швидкості двигуна).

4. Розроблений спосіб прогнозуючого векторного керування активним випрямлячем струму забезпечує при спрощенні своєї технічної реалізації підт-

римання високого значення мережного коефіцієнта потужності АЕП з АІС-ШІМ і малого значення загального коефіцієнта гармонік струму мережі (що складають для номінального режиму відповідно більше 0,99 і менше 4,7%), а також дозволяє зменшити в 2,5 рази значення індуктивності згладжуючого дроселя і є нечутливим до температурної зміни параметрів елементів силового кола АЕП.

5. Створені на основі запропонованих способів прогнозуючого векторного керування й підпорядкованого регулювання структури САК асинхронним ЕП з АІС-ШІМ забезпечують ефективне регулювання швидкості (у діапазоні швидкостей 1:100 вниз від номінальної зі смугою пропускання за швидкістю від 28 Гц до 85 Гц і можливістю одно- і двозонного регулювання швидкості) і положення ротора (у тому числі в позиційному й слідкуючому режимах). Це дозволяє застосовувати АЕП з АІС-ШІМ при запропонованому керуванні як у загальнопромисловому електроприводі широкого призначення, так і – у спеціальних (позиційному й слідкуючому) електроприводах.

6. Розроблене керування АЕП з АІС-ШІМ при провалах мережної напруги виключає аварійні ситуації, які можуть викликати виходи з ладу силових ключів перетворювача частоти й двигуна в даних режимах, а також забезпечує наступне автоматичне повторне увімкнення електропривода при швидкодіючому його виході на заданий режим роботи.

7. Достовірність отриманих наукових результатів підтверджена збігом розрахункових результатів, отриманих аналітично або на імітаційній моделі, з експериментальними дослідженнями на макетному зразку АЕП з АІС-ШІМ потужністю 5,5 кВт (з похибкою, що не перевищує 5-7% – для напруг і струмів; 1-2% – для швидкості й мережного коефіцієнта потужності, де менші значення відповідають сталим режимам, а більші – динамічним режимам).

8. Результати дисертаційної роботи впроваджені у ВАТ НДІ “Перетворювач” в розробленій конструкторській документації на дослідний зразок АЕП з АІС-ШІМ (напругою 6 кВ, потужністю 1600 кВт) і можуть бути використані науково-дослідними й проектними організаціями, які займаються розробкою нових видів частотно-регульованих електроприводів.

ПУБЛІКАЦІЇ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Волков А. В. Асинхронный электропривод на основе автономного инвертора тока на запираемых тиристорах с прогнозирующим релейно-векторным регулированием статорного тока / А. В. Волков, И. А. Косенко // Электротехника. – 2008. – №10. – С. 6-17.

2. Волков А. В. Совершенствование регулирования статорного тока в асинхронных электроприводах с автономным инвертором тока / А. В. Волков, И. А. Косенко // Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету. Тем. вип.: Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика. – Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2007. – С. 78-79.

3. Косенко И. А. Сравнение частотно-токового и частотно-напряженческого способов релейно-векторного управления асинхронными

электроприводами с автономным инвертором тока / И. А. Косенко // *Електротехніка та електроенергетика*. – 2008. – №1. – С. 52-58.

4. Волков А. В. Асинхронный электропривод на основе автономного инвертора тока с широтно-импульсной модуляцией / А. В. Волков, И. А. Косенко // *Технічна електродинаміка: Проблеми сучасної електротехніки*. – 2008. – Ч.1. – С. 81-86.

5. Волков А. В. Прогнозирующее релейно-векторное регулирование в асинхронных электроприводах с инвертором тока / А. В. Волков, И. А. Косенко // *Вісник Кременчуцького держ. університету*. – Кременчук: КДПУ, 2008. – Вип.№3(50). – Ч.1. – С. 98-102.

6. Волков А. В. Электромеханические процессы асинхронного электропривода с автономным инвертором тока при прогнозирующем релейно-векторном регулировании статорного напряжения / А. В. Волков, И. А. Косенко // *Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”*. – Харків: НТУ «ХП», 2008. – №.30. – С. 164-165.

7. Волков А. В. Прогнозирующее релейно-векторное управление активным выпрямителем тока / А. В. Волков, И. А. Косенко // *Вісн. Кременчуцького держ. університету*. – Кременчук: КДПУ, 2009. – Вип.№3(56). – Ч.1. – С. 49 – 52.

8. Волков А. В. Анализ электромагнитных процессов асинхронного двигателя при питании от автономного инвертора тока с широтно-импульсной модуляцией / А. В. Волков, И. А. Косенко // *Технічна електродинаміка*. – 2009. – № 1. – С. 12-19.

9. Волков А. В. Быстродействующий асинхронный электропривод с автономным инвертором тока и активным выпрямителем тока / А. В. Волков, И. А. Косенко // *Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”*. – Харків: НТУ «ХП», 2010. – №.28. – С. 169-171.

10. Волков А. В. Совершенствование прогнозирующего релейно-векторного управления активным выпрямителем тока в асинхронном электроприводе с автономным инвертором тока / А. В. Волков, И. А. Косенко // *Технічна електродинаміка*. – 2010. – №6. – С. 24-34.

11. Волков А. В. Управление при провале сетевого напряжения асинхронным электроприводом с автономным инвертором тока / А. В. Волков, И. А. Косенко // *Вісник Кременчуцького держ. університету*. – Кременчук: КДПУ, 2010. – Вип.№3(62). – Ч.2. – С. 11-14.

12. Волков А. В. Исследование энергетических показателей асинхронного электропривода на основе автономного инвертора тока / А. В. Волков, И. А. Косенко // *Електротехнічні та комп'ютерні системи. Тем. вип.: Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія и практика*. – К: Техніка, 2011. – Вип. №3(79). – С. 40-42.

13. Волков А. В. Исследование особенностей прогнозирующего управления асинхронным электроприводом с автономным инвертором тока / А. В. Волков, И. А. Косенко // *Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Тем. вип.: Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика*. – Кременчук: КрНУ, 2012. – Вип. 3/2012(19). – С. 90-93.

14. Косенко И. А. Асинхронный электропривод с автономным инвертором тока и усовершенствованным управлением / И. А. Косенко // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну: Енергоефективність. Проблеми силової електроніки та електротехніки. – К.: КНУТД, 2012. – Вип. №1(63). – С. 16-21.

15. Волков А. В. Релейное векторное регулирование тока в асинхронных электроприводах с автономным инвертором тока / А. В. Волков, И. А. Косенко // Матеріали Міжнародної науково-технічної конф. «Електромеханічні системи, методи моделювання та оптимізації», 15–17 травня 2007 р. – Кременчук: Вісник КДПУ. – 2007. – Вип. 3(44). – Ч. 1. – С. 21-24.

16. Волков А. В. Асинхронный электропривод на основе автономного инвертора тока с улучшенной электромагнитной совместимостью с питающей сетью / А. В. Волков, И. А. Косенко // Матеріали XVI Міжнародної науково-технічної конф. «Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія та практика», 14–19 вересня 2009 р., Алушта – Львів: ЕКОінформ. – 2009. – С. 153-154.

17. Волков А. В. Исследование способов прогнозирующего управления асинхронным электроприводом с автономным инвертором тока / А. В. Волков, И. А. Косенко // Матеріали XV Міжнародної науково-технічної конф. «Электроприводы переменного тока», 12-16 травня 2012 р. – Єкатеринбург: ФДАОЗ ВПО “УрФУ ім. Б. М. Єльцина”. – 2012. – С. 85-88.

18. Спосіб векторного регулювання струму в асинхронному електроприводі з трифазним автономним інвертором струму на тиристорах, що замикаються / О. В. Волков, І. О. Косенко // Пат. 30471 Україна, МПК6 Н02Р 7/00, Н02Р 21/00. №u200712888; заявл. 15.11.2007; опубл. 25.02.2008, Бюл. №4. – 18с.

19. Спосіб керування трифазним активним випрямлячем струму / О. В. Волков, І. О. Косенко // Пат. 45720 Україна, МПК(2009) Н02Р 7/00, Н02Р 21/00. № u200905117; заявл. 25.05.2009; опубл. 25.11.2009, Бюл. №22.– 13 с.

20. Спосіб керування при провалі мережної напруги асинхронним електроприводом з трифазним автономним інвертором / О. В. Волков, І. О. Косенко // Пат. №55778 Україна, МПК-2011-01 Н02Р 21/00, Н02Н 3/00. № u201007028; заявл. 07.06.2010; опубл. 27.12.2010, Бюл. №24.– 11 с.

Особистий внесок здобувача в роботах, що опубліковані у співавторстві, полягає: [1,5,8,10] – отримав нові аналітичні залежності, які дозволяють здійснити прогнозує керування для АІС та АВС; [1,2,3-6,12,14,15,17,18] – розробив і дослідив структури автоматичного керування для АЕП з АІС й тиристорним випрямлячем; [7,9,10,12,13,16,19] – розробив і дослідив структури автоматичного керування для АЕП з АІС й активним випрямлячем струму; [11,20] – розробив та дослідив автоматичне керування для АЕП з АІС при провалах напруги в мережі живлення.

АНОТАЦІЯ

Косенко І. О. Удосконалення автоматичного керування асинхронним електроприводом з автономним інвертором струму. – На правах рукопису.

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, 2013.

У дисертації розроблені та науково обґрунтовані ефективні способи прогнозуючого векторного керування і створені на їх основі спрощені структури автоматичного регулювання для асинхронного електропривода (АЕП) з автономним інвертором струму (АІС) з широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ). Вони забезпечують швидкодіюче керування електромеханічними процесами (з часом відпрацювання струму статора і електромагнітного моменту 6-24 мс) та поліпшенні енергетичні показники зазначеного електропривода (для номінального режиму: з коефіцієнтом потужності не менше 0,99 і загальним коефіцієнтом гармонік струму мережі – менше, ніж 4,7%).

На імітаційній моделі і експериментальному зразку АЕП з АІС-ШІМ із запропонованим керуванням досліджені електромагнітні й електромеханічні процеси зазначеного електропривода при регулюванні швидкості АД або положення його ротора, а також при провалах мережної напруги і її наступному відновленні. Визначено параметри швидкодії й енергетичні показники розглянутого АЕП з АІС-ШІМ. Показано, що з запропонованим керуванням й розробленими структурами регулювання АЕП з АІС-ШІМ може використовуватися в загальнопромислових й спеціальних (позиційному та слідкуючому) електроприводах.

Ключові слова: асинхронний електропривод, автономний інвертор струму, активний випрямляч струму, прогнозуюче керування.

АННОТАЦИЯ

Косенко И. А. Совершенствование автоматического управления асинхронным электроприводом с автономным инвертором тока. – На правах рукописи.

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, 2013.

В диссертации разработаны и научно обоснованы эффективные способы прогнозирующего векторного управления и созданы на их основе структуры автоматического регулирования для асинхронного электропривода (АЭП) с автономным инвертором тока (АИТ) с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ). У данного типа АЭП нет ограничений по длине кабеля, соединяющего асинхронный двигатель (АД) с преобразователем частоты (ПЧ), и не требуется для надежной эксплуатации применения специального (с усиленной изоляцией) двигателя.

В первом разделе из отечественной и зарубежной научно-технической литературы выполнен анализ существующих силовых схем АЭП с АИТ-ШИМ, снабженного тиристорным управляемым выпрямителем (УВ) или активным выпрямителем тока (АВТ), а также выполнен анализ известного автоматического управления ними.

Во втором разделе проанализированы и выбраны методы исследований, разработаны математические и имитационные (компьютерные) модели АЭП с АИТ-ШИМ, снабженного УВ или АВТ, которые учитывают несинусоидальную форму входных и выходных фазных токов и напряжений ПЧ, дискретность автоматического управления и переключения его силовых ключей.

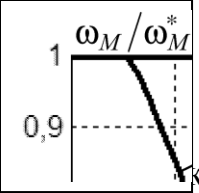
В третьем разделе с помощью разработанных схем замещения АЭП с АИТ-ШИМ, снабженного УВ, для произвольного межкоммутационного интервала (МИ) силовых ключей инвертора предложено описание электромагнитных процессов (ЭМП) в системе “инвертор тока – двигатель”. Исследованы ЭМП в АИТ, нагруженном на АД, и получены в явном алгебраическом виде аналитические зависимости для расчета обобщенных векторов статорных тока и напряжения и их приращений на произвольном МИ силовых ключей инвертора.

Из анализа указанных зависимостей предложено осуществлять прогнозирование (на произвольном МИ силовых ключей АИТ) направления приращения обобщенного вектора статорного тока АД по направлению вектора выходного тока инвертора, а обобщенного вектора статорного напряжения – по направлению прогнозирующего вектора тока, вычисляемого в виде разности обобщенных векторов выходного тока инвертора и статорного тока двигателя. Исходя из этого, разработаны системы прогнозирующего векторного регулирования статорных тока и напряжения двигателя, а на их основе созданы структуры автоматического прогнозирующего частотно-токового и частотно-напряженческого управления АЭП с АИТ-ШИМ.

В четвертом разделе исследованы ЭМП в системе “трёхфазная питающая сеть – активный выпрямитель тока” и получены в явном алгебраическом виде аналитические зависимости для расчета обобщенного вектора сетевого тока и вектора его приращения на произвольном МИ силовых ключей активного выпрямителя. Из анализа этих зависимостей предложено осуществлять прогнозирование (на текущем МИ силовых ключей АВТ) направления приращения обобщенного вектора сетевого тока АЭП с АИТ-ШИМ, снабженного АВТ, по направлению входного тока АВТ. С учетом этого разработана система прогнозирующего векторного регулирования сетевого тока АЭП с АИТ-ШИМ, снабженного АВТ, и на ее основе создана структура автоматического управления указанным электроприводом в целом.

В пятом разделе разработано автоматическое управление для АЭП с АИТ-ШИМ, снабженного УВ или АВТ, которое обеспечивает безаварийную работу электропривода при провале сетевого напряжения и его последующем восстановлении, а также быстродействующий выход АЭП на установленный режим работы после восстановления сетевого напряжения.

Определены параметры быстродействия (времена отработки статорного



ка и электромагнитного момента двигателя равны 6-24 мс) и энергетические показатели (для номинального режима: сетевой коэффициент мощности электропривода составляет не менее 0,99, а общий коэффициент гармоник сетевого тока – менее 4,7%) для рассматриваемого АЭП с АИТ-ШИМ. Показано, что с предложенным управлением и разработанными структурами регулирования АЭП с АИТ-ШИМ может применяться в общепромышленных и специальных (позиционном и следящем) электроприводах. Достоверность полученных результатов подтверждена экспериментальными исследованиями на макетном образце АЭП с АИТ-ШИМ с двигателем мощностью 5,5 кВт, напряжением 380 В.

Ключевые слова: асинхронный электропривод, автономный инвертор тока, активный выпрямитель тока, прогнозирующее управление.

ABSTRACT

Kosenko I. O. Improvement of automatic control for induction electric drive with the current source inverter. – On the right of manuscript.

Thesis for the degree of candidate of technical sciences in the specialty 05.09.03 – Electrotechnical complexes and systems. – State institution of higher education «National Mining University», Dnipropetrovs'k, 2013.

In the thesis the effective methods of predictive vector control are developed and scientifically substantiated. On their basis simplified structures of automatic regulation for the induction electric drive (IED) with pulse-width modulation (PWM) current source inverter (CSI) are designed. They provide high-speed control of electromechanical processes (with adjustment of stator current time and that of electromagnetic torque 6-24 ms) and improved energy performance of the mentioned electric drive (for the nominal rating: with a power factor not less than 0,99 and the total harmonic distortion of line current less than 4,7%).

The electromagnetic and electromechanical processes of IED with PWM CSI were investigated on its simulation model and experimental example with suggested control when induction motor speed or rotor position was adjusted and the line voltage was failed and then recovered subsequently. The speed parameters and energy performance of the studied IED with PWM CSI were determined. It is shown that the suggested control, and developed regulation structures of IED with PWM CSI can be used in general industrial and special (positional and follow-up) electric drives.

Keywords: induction electric drive, current source inverter, current source rectifier, predictive control.