

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ТАВРІЙСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Соломаха Олександр Вікторович

УДК 681.527.2

**ВДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ
АСИНХРОННИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ
В СИСТЕМАХ ЗРОШЕННЯ**

Спеціальність 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Мелітополь – 2016

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Запорізькому національному технічному університеті Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник **Бондаренко Валерій Іванович**, кандидат технічних наук, доцент, Запорізький національний технічний університет, завідувач кафедри електропривода та автоматизації промислових установок.

Офіційні опоненти: **Островерхов Микола Якович**, доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», завідувач кафедри теоретичної електротехніки;

Вовк Олександр Юрійович, кандидат технічних наук, доцент, Таврійський державний агротехнологічний університет, доцент кафедри електротехніки і електромеханіки.

Захист відбудеться «31» березня 2016 р. о 13-00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 18.819.01 в Таврійському державному агротехнологічному університеті за адресою: 72310, м. Мелітополь, пр. Б. Хмельницького, 18.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Таврійського державного агротехнологічного університету за адресою: 72310, м. Мелітополь, пр. Б. Хмельницького, 18.

Автореферат та дисертація розміщені за адресою в мережі Internet www.tsatu.edu.ua/nauka/category/dissertation

Автореферат розісланий «29» лютого 2016 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

С.О. Квітка

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Системи зрошення широко застосовуються у сільському господарстві для отримання високого вихідного валового продукту. Для приводу насосних установок в цих системах в основному використовуються асинхронні двигуни (АД). Переважна більшість з них застосовуються в нерегульованому приводі, що пояснюється складними нелінійними електромагнітними процесами в АД. Такі електроприводи мають низькі експлуатаційні показники. При застосуванні керованого електропривода можливо досягти енергозощадження до 60%, значно знизити пусковий та робочий струми АД, тим самим зменшити втрати електроенергії, усунути падіння напруги, коливання швидкості АД та обмежити можливі гідроудари, а також зменшити непродуктивні втрати води за рахунок зменшеного тиску в гідросистемі, тощо.

Для регулювання параметрами АД широко застосовують векторне і скалярне керування. В приводах насосів систем зрошення в наш час використовують перетворювачі частоти (ПЧ) лише зі скалярним керуванням. Це зумовлено меншою вартістю відносно ПЧ із векторним керуванням (ВК) та недостатньою обґрунтованістю їх застосування для вирішення проблем гідроударів. Компанія АВВ у співпраці з компанією ІТТ Flygt встановили, що керування моментом АД до повного зупинення насоса дозволяє практично повністю уникнути гідроударів. В насосах систем зрошення це можливо реалізувати тільки за допомогою застосування ВК. Крім того, в системах крапельного зрошення, які набувають все більшого розповсюдження, застосовуючи ПЧ з ВК можна відмовитись від встановлення дорогого редуктора-регулятора тиску, отримати якісне керування тиском із швидкодією (притаманній тільки при ВК), яка запобігає розривам крапельних стрічок при різких змінах тиску в гідросистемі.

У порівнянні зі скалярним, досягається значно більша точність керування та ефективність використання електричної енергії і енергоємних механізмів. Крім того, ВК дозволяє оцінювати швидкість та потокозчеплення без відповідних давачів, що забезпечує використання звичайних АД загальнопромислових серій, в яких не передбачена компоновка цими давачами. При цьому на точність оцінювання кутової швидкості ротора істотно впливає активний опір кола ротора, з його температурною нестабільністю.

Використання керованого асинхронного електропривода (АЕП) на базі ВК в системах зрошення АПК підвищить ефективність енергозощадження та експлуатаційні показники при покращенні якості зрошення порівняно зі скалярним.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертація виконана відповідно до Комплексної Державної програми енергозбереження України, затвердженої постановою Кабінету Міністрів України від 05.02.97 р. № 148. Дисертаційна робота є складовою частиною держбюджетної роботи № 0105U005049 «Дослідження і розробка електромеханічних систем і засобів автоматизації технологічних процесів» 2004-2006 р.р. Тематика роботи відповідає Закону України від 11.07.2001 р. № 2623-III «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки», зокрема, п. 3 «Енергетика та енергоефективність» статті 3 «Пріоритетні напрями розвитку науки і техніки на період до 2020 року».

Мета і завдання дослідження. Метою дослідження є енергозощадження в асинхронних електроприводах насосів систем зрошення за рахунок використання векторного керування асинхронним двигуном, при застосуванні силового LC-фільтру на виході перетворювача частоти та інжекції для ідентифікації активного опору кола ротора.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- проаналізувати сучасний стан теорії і практики використання керованого приводу і методів керування АЕП систем зрошення з метою визначення шляхів вдосконалення системи ВК;
- обґрунтувати критерії використання ВК в поєднанні з динамічними і статичними режимами роботи керованого приводу і характерними особливостями систем зрошення;
- розробити алгоритмічні блоки-складові системи ВК, які забезпечать більш ефективне використання ВК в системі зрошення;
- розробити комп'ютерну модель ВК АЕП системи зрошення з розробленими рішеннями та визначити її статичні та динамічні характеристики;
- провести лабораторно-промислове дослідження та польові випробування з метою визначення точності регулювання АЕП з системою ВК із розробленими алгоритмічними блоками;
- підтвердити економічну ефективність практичного впровадження отриманих наукових результатів в керованому приводі насосних установок систем зрошення.

Об'єкт дослідження – статичні та динамічні процеси в асинхронному електроприводі з векторним керуванням систем зрошення.

Предмет дослідження – статичні та динамічні характеристики систем векторного керування асинхронним електроприводом для підвищення ефективності систем зрошення.

Методи дослідження. В дослідженні використовувалась сучасна теорія автоматичного керування безперервними й дискретними системами та адаптивного керування з ідентифікацією параметрів для синтезу і модифікації спостережників швидкості та потокозчеплення, модифікації блоку оцінювання синхронної швидкості, синтезу попереджувального компенсатора, синтезу блоків виділення постійних складових з двофазних і однофазних сигналів. За допомогою прямого методу Ляпунова досліджувалась стійкість руху адаптивних спостережників потокозчеплення ротора та статора, а також, швидкості ротора та постійної часу кола ротора. Методи теорії електропривода й простору стану використовувались для математичного опису електромагнітних процесів, а методи чисельного та фізичного моделювання для дослідження характеристик розроблених рішень.

Наукова новизна одержаних результатів:

Вперше розроблено наукові основи створення систем з попереджувальною компенсацією спотворень вихідної напруги силового пасивного LC-фільтру на виході перетворювача частоти, яка коригує програмні сигнали блока широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) для забезпечення на виході LC-фільтру напруги без спотворення за фазою і без зменшення амплітуди, відносно напруги програмних

сигналів блока ШІМ, які відрізняються від аналогічних суттєвою алгоритмічною простотою. Крім того, застосування попереджувального компенсатора дозволяє повернути систему до стійкого стану зі збереженням показників якості регулювання у робочому діапазоні, при цьому похибки не перевищують 3%.

Вдосконалено модель асинхронного електропривода з векторним керуванням, яка відрізняється від відомих сукупністю пасивного LC-фільтра на виході ПЧ та наявністю інжектів складової в намагнічуючу складову струму статора, що дозволило вибрати енергозощаджуючі режими за рахунок підвищення точності швидкості ротора не більше 2,7%, визначеної при проведенні польових випробувань в робочому діапазоні і швидкодії енергоємних виконавчих механізмів в системах зрошення.

Отримано, раніше невідомі, закономірності динаміки асинхронного електропривода, при формуванні траєкторії швидкості при гальмуванні, впритул до нульової та підтриманням відповідного моменту, яке виключає різке змінювання витрат води, що може породжувати хвилі тиску і гідравлічні удари в трубах, запірній арматурі, забезпечуючи підтримку високого ККД двигуна, за рахунок роздільного керування складовими струму статора (намагнічуючої та моментної), використання яких дозволило значно підвищити експлуатаційні показники систем зрошення.

Отримала подальший розвиток теорія електропривода з векторним керуванням щодо особливостей динамічних і статичних режимів виконавчих механізмів систем зрошення в частині компенсації високочастотних збурень.

Достовірність отриманих результатів підтверджується збігом результатів аналітичних досліджень автора з результатами, отриманими шляхом математичного, лабораторно-промислового та польового досліджень на АД різної потужності.

Практичне значення одержаних результатів:

- метод попереджувальної компенсації був використаний при розробці систем керування перетворювачів частоти з вихідним LC-фільтром, які розробляються та виготовляються на «НВП Перетворювач-комплекс» (м. Запоріжжя), перший ПЧ з яких типу ПЧ5-D2-640/380/50-070-B00-УХЛ4 (640 А, 380 В) з вихідним LC-фільтром використовується в електроприводі димососа доменної печі №2 МК «Запоріжсталь» (акт впровадження від 09.07.2015 р.);

- алгоритми векторного керування з розробленими в дисертації рішеннями реалізовані на процесорі LPC4357 (сімейства ARM Cortex-M4/M0 фірми NXP Semiconductors) нової плати керування, спеціально розробленої «НВП Перетворювач-комплекс» (м. Запоріжжя) для перетворювачів частоти серії ПЧ5 з векторним керуванням (акт впровадження від 09.07.2015 р.);

- практична ефективність результатів запропонованих науково-технічних рішень підтверджена експериментальними випробуваннями на агропідприємстві СФГ «Міраж» в системі крапельного зрошення площею 15 га (акт впровадження від 12.10.2015 р.);

- матеріали даної роботи використовуються в навчальному процесі на кафедрі «Електропривода та автоматизації промислових установок» Запорізького національного технічного університету при підготовці студентів всіх ОКР за

спеціальністю «Електромеханічні системи автоматизації та електропривод» (дисципліни «Автоматизація технологічних процесів», «Моделювання електромеханічних систем», «Спецзавдання моделювання», «Комп'ютерні технології автоматизації», «Типовий електропривод» та інші, в курсовому і дипломному проектуванні) (акт впровадження від 17.09.2015 р.).

Особистий внесок здобувача. Всі основні результати, що виносяться на захист, отримані здобувачем особисто. У наукових працях, опублікованих у співавторстві, здобувачеві належать: [5] - синтез спостережника для оцінки швидкості ротора АД; [17] - частково синтез спостережника, дослідження стійкості роботи спостережника прямим методом Ляпунова; [15] - розробка двох блоків оцінювання постійних складових у сигналах, введення блока запам'ятовування; [6] - синтез спостережника, дослідження стійкості за методом Ляпунова; [4, 7] - синтез попереджувального компенсатора фільтра, складена схема моделювання системи з попереджувальним компенсатором; [8] - порівняння й аналіз блоків оцінювання потокозчеплення при наявності інжектваної складової; [9] - синтез спостережника, синтез фільтра і його моделювання, аналіз результатів, порівняння отриманих у статті блоків з кількості математичних операцій, подання рівнянь спостережників і фільтра в дискретному вигляді; [10] - розробка схеми експерименту, участь у проведенні експерименту, аналіз результатів. У роботах [4-8, 11, 15, 17] здобувачем складені моделі і проведені дослідження блоків шляхом чисельного моделювання повністю, а в роботах [12, 13] частково, і проведений аналіз результатів. У роботі [12] здобувачем проведені огляд і аналіз літератури в частині оцінювання швидкості ротора та синхронної швидкості, а в роботах [7, 8, 13, 14] - у частині оцінювання потокозчеплень.

Дослідження проводились у ЗНТУ, на «НВП «Перетворювач-комплекс», м. Запоріжжя та на агропідприємстві СФГ «Міраж», м. Орхів.

Апробація результатів дисертації. Матеріали роботи доповідалися, обговорювалися й були схвалені на таких міжнародних науково-технічних конференціях: XII міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія й практика», НТУ "ХП", м. Алушта, Крим, 2005 р.; 12 міжнародна конференція з автоматичного управління «Автоматика-2005», НТУ "ХП", м. Харків, 2005р.; міжнародна науково-технічна конференція «Електромеханічні системи, методи моделювання та оптимізації», КДПУ, м. Кременчук, 2005 р.; XIV міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія й практика», ДДТУ, м. Миколаївка, Крим, 2007 р.; міжнародна науково-технічна конференція «Електромеханічні системи, методи моделювання та оптимізації», КДПУ, м. Кременчук, 2007 р.; VI Міжнародна науково-технічна конференція, присвячена пам'яті академіка І.І. Мартиненка «Енергозабезпечення технологічних процесів в агропромисловому комплексі України», ТДАТУ, смт. Кирилівка, Запорізькій області, 2015 р.

Публікації. За матеріалами даної роботи опубліковано 14 статей у журналах, що входять до списку фахових видань ДАК, стаття у закордонних виданнях, 2 роботи в матеріалах конференції, а також одержано 1 патент на корисну модель.

Структура й обсяг роботи. Дисертація складається з вступу, 5 розділів, висновків, переліку використаних джерел і 9 додатків. Загальний обсяг дисертації 216 сторінок, обсяг основного тексту дисертації 163 сторінок, рисунків - 60, таблиць - 4, перелік використаних джерел містить 109 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність роботи і показано її зв'язок з науковими програмами, сформульовані мета і основні задачі дослідження, наведені наукові положення, які виносяться на захист, данні про практичне значення і реалізацію результатів дисертаційних досліджень, а також рівень апробації результатів роботи і особистий внесок здобувача у публікаціях.

У першому розділі «**Методи автоматизованого керування складними об'єктами та формулювання завдання дисертаційних досліджень**» був проведений огляд і аналіз існуючих методів, та визначені задачі, які підлягають подальшому дослідженню, а саме розробка алгоритмічних блоків-складових системи ВК, яка була б працездатна при наявності низькочастотної інжектваної складової в струм статора, змінюванні активного опору кола ротора, постійних складових в каналах вимірювання струму та пасивного LC-фільтру на виході ПЧ.

Для регулювання швидкості і моменту АД в сучасному електроприводі застосовують два основні методи частотного управління - скалярний і векторний. Застосування саме векторного метода керування в системах зрощення має характерні переваги, як то:

- можливість незалежного і практично безінерційного регулювання моменту і швидкості одночасно, що дозволяє істотно пом'якшувати гідроудари;
- можливість забезпечення номінального моменту на валу починаючи з нульової швидкості, що зумовлює довговічність зворотних клапанів і запірної арматури завдяки регулюванню моменту АД при його роботі на загальний колектор;
- підтримка високого ККД двигуна, за рахунок роздільного керування складовими струму статора (намагнічуючої та моментної) і, як наслідок, зниження втрат на намагнічування і нагрів.

Найбільш вагомий внесок у розробку теорії векторного керування АД внесли зарубіжні вчені, в першу чергу F. Blaschke, P. Vas, D.W. Nowatny, T.A. Lipo, K. Rajasekara, K. Matsuse, A. Kawamura, Z. Krzeminski; в Росії - Д.Б. Ізосімов, В.І Уткін; в Україні - С.М. Пересада, Е.М. Потапенко, О.В. Садовой, О.С. Бешта, М.Я. Островерхов, О.В. Волков та інші.

Для ВК необхідна інформація про кутову швидкість ротора. Встановлення давачів швидкості ускладнено, так як АД, які використовуються в системах зрощення, не були призначені для регулювання швидкості, та не мають місць для їх встановлення. Тому для отримання інформації про кутову швидкість ротора використовуються складні методи для її оцінки, які мають великий обсяг обчислень. На точність оцінювання кутової швидкості ротора АД впливає точність оцінювання кутової швидкості вектора потокозчеплення (синхронної швидкості), на яку впливає змінний від температури активний опір кола ротора. Для оцінювання активного опору кола ротора в реальному часі необхідне змінення модуля вектора потокозчеплення ротора. З цією метою до намагнічуючої складової струму статора інжектують низькочастотну синусоїдну складову з малою амплітудою. Відповідно, у потокозчепленні з'являється гармонійна складова, що бере участь в ідентифікації. Використання інжекції для оцінювання активного опору кола ротора викликає необхідність постановки додаткових вимог до методів оцінювання потокозчеплень, а саме, доволі точне відтворення

інжектіваної складової в оцінці модуля вектора потокозчеплення. При використанні інжекції, деякі змінні ВК можуть містити паразитну змінну складову частоти інжектіваного сигналу, яку треба виділяти.

На практиці давачі струму мають постійні зміщення, при цьому у вимірюваному сигналі з'являється постійна складова, внаслідок чого виникають пульсації моменту й швидкості ротора, що іноді призводять до нестійкості системи. Незважаючи на важливість усунення в реальному часі впливу постійних зсувів у багатофазних сигналах, публікацій на цю тему мало. Існуючі методи мають потребу в зовнішній інформації про частоту першої гармоніки вхідного сигналу, яка є невідомою. Встановлення пасивного LC-фільтра на виході ПЧ приводить до змінення амплітуди й фази головних гармонік вихідних напруг і струмів, що викликає погіршення динаміки електропривода, а у деяких випадках призводить до втрати стійкості системи керування. У відомих роботах, проблема вирішується методами, побудованими за допомогою складних фільтрів, яким притаманна велика обчислювальна складність, або встановленням додаткових давачів, що не завжди є конструктивно можливим.

Другий розділ «Оцінка вектора стану асинхронного електропривода» присвячений розробці рішень для оцінювання вектора потокозчеплення, синхронної швидкості, кутової швидкості та постійної часу кола ротора.

В роботі розглядався електротехнічний комплекс з наступними допущеннями, до якого входять:

а) система ВК, до якої як складові частини входять розроблені в дисертаційній роботі блоки, з дискретністю $T_s = 200$ мкс,

б) АД як об'єкт керування, що описується класичними рівняннями, з рівномірно розподіленим потоком у повітряному проміжку й лінійній залежності потокозчеплення від струму намагнічування,

в) ПЧ, представлений блоком, що формує гармонічний сигнал програмної напруги з накладеним на нього шумом із частотою 4 кГц, що відповідає несучої в ПЧ, і амплітудою, що складає 60% від значення напруги ланки постійного струму,

г) навантаження на валу, що імітується прикладанням зовнішнього моменту (навантажувального та генераторного).

Розглядалися такі характерні для АЕП режими роботи: початкове намагнічування, розгін до заданої швидкості, реверс, гальмування. Наведена та розглянута функціональна схема ВК АЕП з використанням інжекції для ідентифікації активного опору кола ротора (рис. 1). Розглянуті параметри та особливості інжектіваного сигналу. Система ВК складається з таких блоків: 1 – аналогові RC-фільтри, 2 – блок оцінювання постійних складових, 3 – компенсатори спотворень, внесених аналоговими RC-фільтрами, 4 – блок оцінювання кутової швидкості вектора потокозчеплення ротора, 5 – спостережник потокозчеплення ротора, 6 – блок оцінювання активного опору кола статора, 7 – блок оцінювання кутової швидкості ω й постійної часу ротора, 8 – блок обчислення величини абсолютного ковзання, 9 – блок обчислення кутової швидкості ротора, 10 - формувач електромагнітного моменту й програмних струмів, 11 - регулятори струмів, 12 – попереджувальний компенсатор пасивного силового фільтра. Сірим кольором марковані блоки, які необхідно розробити, щоб досягти збільшення діапазону регулювання швидкості й поліпшення точності керування, білим - запозичені.

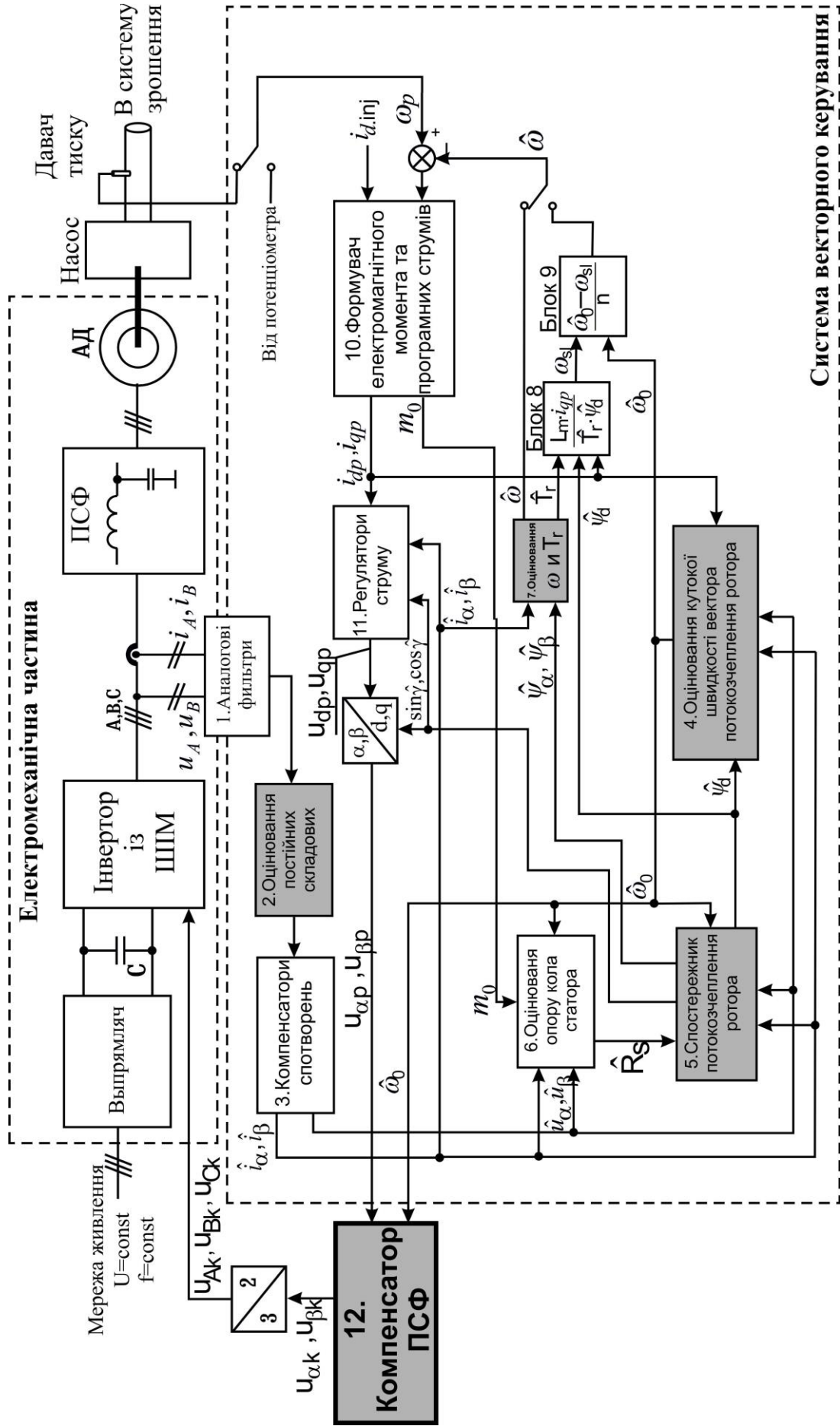


Рис. 1. Функціональна схема АЕП з використанням інжекції параметрів та попереджувального компенсатора LC-фільтра.

Вдосконалений спостережник для оцінювання вектора потокозчеплення ротора ψ_r , працездатний у діапазоні швидкостей ротора від нульової до номінальної. У якості вихідного був узятий спостережник Потапенко Е.М., Потапенко Е.Е., який має вигляд

$$\hat{\psi}_r = l(\hat{\psi}_r + \hat{\omega}_0^{-1} L_{rm} J_g e_r) + L_{rm} e_r, \quad (1)$$

де $\hat{\omega}_0$ - оцінка синхронної швидкості, $e_r = u - R_s i - \sigma L_s \dot{i}$ - протиЕРС ротора, u, i - статорні наруга та струм, R_s - активний опір статора, σ - коефіцієнт розсіювання, $L_{rm} = L_r L_m^{-1}$, L_s, L_r, L_m - індуктивності статора, ротора та взаємна, J_g - кососимметрична матриця, l - коефіцієнт підсилення спостережника. Як видно з (1), спостережник має особливість (ділення на нуль) при $\omega_0 = 0$.

Введення змінного, залежного від синхронної швидкості, коефіцієнта підсилення спостережника, дозволило одержати блок для обчислення вектора потокозчеплення ротора (2) зі змінним коефіцієнтом (3):

$$\hat{\psi}_r = z - L_{rm} \sigma L_s (E_g + l \cdot J_g) i, \quad \dot{z} = L_{rm} \{ l [\hat{\omega}_0 \hat{\psi}_r L_{mr} + J_g e_s] + e_s \}. \quad (2)$$

$$l = \begin{cases} l \cdot \text{sign}(\hat{\omega}_0) / \omega_0^*, & |\hat{\omega}_0| \leq \omega_0^*, \\ l / \hat{\omega}_0, & |\hat{\omega}_0| > \omega_0^*, \end{cases} \quad (3)$$

де $e_s = u - R_s i$ - протиЕРС статора, E_g - одинична матриця, $l < 0$ - постійний коефіцієнт спостережника, $\omega_0^* = (0.05 \div 0.2) \omega_{ном}$ - точка сполучення коефіцієнтів. Введення змінного коефіцієнта, що залежить від $\hat{\omega}_0$, обумовило забезпечення діапазону працездатності блока від нульової до номінальної кутової швидкості ротора АД.

На відміну від вихідного, спостережник не містить диференціювання струму (при обчисленні e_r), чим досягнуто підвищення завадозахищеності системи.

Вдосконалений метод Ohtani. Метод Ohtani

$$\hat{\psi}_s = e_s + \frac{1}{T_L} (\psi_s^* - \hat{\psi}_s), \quad (4)$$

один з небагатьох блоків оцінювання вектора потокозчеплення, працездатний при малих швидкостях ротора. Його особливістю є можливість підстроювання оцінки модуля потокозчеплення під його програмне значення ψ^* . Це забезпечить при необхідній швидкодії оцінювання (при досить великому коефіцієнті передачі T_L^{-1}) відповідність оцінювання власне значенню ψ^* , тобто відсутність інжектованої складової.

Будемо задавати програмне потокозчеплення виразом

$$\psi_s^* = \psi_0^* + \psi_g^*, \quad (5)$$

де ψ_0^* – величина програмного потокозчеплення без інжекції, ψ_g^* – необхідна інжекція в програмне потокозчеплення, для обчислення якої скористаємося рівнянням

$$T_r \cdot \dot{\psi}_g^* + \psi_g^* = L_m i_{dg}, \quad (6)$$

де T_r - постійна часу ротора, i_{dg} - інжектована складова. Отже, система рівнянь (5), (6), забезпечує функціонування блока формування програмного потокозчеплення з урахуванням параметрів інжектованого сигналу. Таким чином, отримав подальший розвиток відомий метод оцінювання вектора потокозчеплення (4) за рахунок використання в ньому модуля програмного потокозчеплення, яке змінюється за визначеною залежністю (5), (6), що обумовило відтворення інжектованої складової у модулі вектора потокозчеплення.

Адаптивні спостережники векторів потокозчеплення ротора й статора. Вектор потокозчеплення (ротора або статора) описується векторно-матричними рівняннями

$$\dot{\psi} = \omega_0 J \psi, \quad \psi = a e \quad (7)$$

де e – протиЕРС двигуна, причому при $e = e_s$, $a = 1$, а при $e = e_r$, $a = L_{rm}$. За допомогою другого методу Ляпунова було синтезовано адаптивного спостережника:

$$\dot{\hat{\psi}} = \hat{\omega}_0 J \hat{\psi} + L \left(\hat{\omega}_0 |\hat{\psi} + a J e \text{sign} \hat{\omega}_0 \right), \quad \hat{\omega}_0^2 = a \left(k_p \hat{\psi}^T J e + k_i \int_0^t \hat{\psi}^T J e dt \right), \quad (8)$$

де коефіцієнти $k_p, k_i > 0$. Знак синхронної швидкості визначимо згідно

$$\text{sign} \hat{\omega}_0 = -\text{sign}(\hat{\psi}^T J e) = \text{sign}(e^T J \hat{\psi}). \quad (9)$$

У порівнянні з обраним прототипом авторів Н. Kubota, К. Matsuse, розроблений адаптивний спостережник (8), (9) відрізняється меншим обсягом обчислень (прототип - система 5-го порядку) на 64%.

Було проведено порівняння методом математичного моделювання розроблених блоків з відомими, працездатними при малих швидкостях ротора, при цьому було встановлено, що всі розроблені блоки працездатні в діапазоні швидкостей ротора від нульової до номінальної, досить точно відтворюють інжектовану складову та відрізняються алгоритмічною простотою. Як результат порівняння виділено два блоки – модифікований метод (4–6) і спостережник (2), (3). Однак, слід зазначити, що спостережник відрізняється більш якісним відтворенням фактичного значення потокозчеплення у період намагнічування і дає найкращий результат порівнюваних блоків при роботі на нульовій швидкості.

Оцінювання синхронної швидкості з урахуванням впливу інжекції. Блок заснований на використанні реактивної потужності двигуна, яка визначається

відомим виразом $Q = -i^T J u = i_\alpha u_\beta - i_\beta u_\alpha$. Блок обчислення синхронної швидкості має вигляд

$$\hat{\omega}_0(Q) = \frac{i_\alpha u_\beta - i_\beta u_\alpha - \sigma L_s (i_\alpha i_\beta - i_\beta i_\alpha)}{\sigma L_s (i_\alpha^2 + i_\beta^2) + L_{mr} L_m i_{dp} i_{dp0}}, \quad (10)$$

де i_{dp} , i_{dp0} – програмні значення повної та постійної складових намагнічуючого струму відповідно. В отриманому виразі враховуються інжекція у намагнічуючий складовий струму статора i_d та у модулі потокозчеплення двигуна ψ_d . Слід зазначити, що, по-перше, оцінювання швидкості (10) не вимагає потреби в інформації про активні опори ротора й статора, які є змінними, по-друге, кутова швидкість визначається проекціями векторів струму й напруги в статорному базисі, у якому ці змінні вимірюються. Недоліком названого блока є те, що він забезпечує належну точність тільки на малій та середній швидкостях. У той же час, точне оцінювання синхронної швидкості на середній та великій швидкостях можна отримати, використовуючи відомий вираз

$$\hat{\omega}_0(u) = \frac{\dot{u}^T J u}{|u|^2}. \quad (11)$$

Об'єднувати переваги цих блоків слід шляхом їх сполучення за допомогою вагового коефіцієнта k . Тоді синхронна швидкість буде визначатися виразом

$$\hat{\omega}_0 = \hat{\omega}_0(Q) \cdot (1 - k) + \hat{\omega}_0(u) \cdot k, \quad (12)$$

де k – ваговий коефіцієнт, що визначається за умов:

$$k = \begin{cases} 0, & |\hat{\omega}_0| < \omega_{low}, \\ 1, & |\hat{\omega}_0| > \omega_{high}, \\ \frac{|\hat{\omega}_0| - \omega_{low}}{\omega_{high} - \omega_{low}}, & \end{cases} \quad (13)$$

де ω_{low} , ω_{high} – нижня й верхня межі діапазону сполучення відповідно.

В результаті моделювання було визначено, що перехід між блоками повинен знаходитися в діапазоні 15–25% від номінальної кутової швидкості потокозчеплення, яку можна визначити приблизно за допомогою залежності $\omega_{0ном} = n \omega_{ном}$, де n – кількість пар полюсів, $\omega_{ном}$ – номінальна кутова швидкість ротора АД.

Адаптивний спостережник для оцінювання кутової швидкості й постійної часу ротора. Вище було отримано оцінку ψ_r . Вважаючи, що відомо ψ_r за допомогою другого методу Ляпунова було одержано спостережник:

$$\dot{\psi}_r = l\dot{\psi}_r + L_m\dot{\alpha}i - (\hat{\alpha} + l)\psi_r + \hat{\omega}_* J\psi_r, \quad (14)$$

$$\hat{\omega}_* = k_{p\omega}\dot{\psi}_r^T J\psi_r + k_{i\omega} \int_0^t \dot{\psi}_r^T J\psi_r dt, \quad (15)$$

$$\hat{\alpha} = k_{p\alpha}(\psi_r - L_m i)^T \dot{\psi}_r + k_{i\alpha} \int_0^t (\psi_r - L_m i)^T \dot{\psi}_r dt,$$

де $\omega_* = n\omega$, n – кількість пар полюсів, ω – невимірювана кутова швидкість ротора, $\alpha = T_r^{-1}$, $\dot{\psi}_r = \dot{\psi}_r - \dot{\psi}_r$. Система (14), (15) дозволяє оцінювання ω_* , α й поліпшувати оцінювання проєкцій вектора потокозчеплення. На відміну від існуючих рішень, при виборі коефіцієнтів запропонованого спостережника його швидкодія не залежить від швидкості ротора. Обсяг обчислень зменшений на 54% в порівнянні з прототипом R. Beguenane, M. Ouhrouche. В усталеному режимі похибка оцінювання постійної часу ротора не перевищує 5%. При відомому активному опорі кола ротора є можливість оцінювати температуру ротора, яку, зокрема, можна використовувати для контролю теплового стану АД.

Третій розділ «Розробка блоків фільтрації однофазних та багатофазних невизначених сигналів» має на меті розробку попереджувального компенсатора скривлень статорної напруги, які вносяться вихідним пасивним силовим LC-фільтром (ПСФ), а також блоків виділення постійних та гармонічних складових з однофазних та двофазних сигналів.

Синтезовано попереджувальний компенсатор ПСФ, який встановлюється на виході ПЧ. Задача полягає в попереджувальній зміні програмних сигналів з амплітуди й фази таким чином, щоб вони компенсували спотворення, внесені ПСФ. Рівняння роботи попереджувального компенсатора фільтра мають вигляд:

$$\begin{cases} u_{\alpha k} = u_{\alpha p}(1 - LC\omega^2) - u_{\beta p}(RC\omega), \\ u_{\beta k} = u_{\beta p}(1 - LC\omega^2) + u_{\alpha p}(RC\omega), \end{cases} \quad (16)$$

де $u_{\alpha p}$, $u_{\beta p}$ – керуючі (програмні) сигнали системи ВК, $u_{\alpha k}$, $u_{\beta k}$ – програмні сигнали з урахуванням компенсації, C, L – ємність і індуктивність фільтра відповідно, R – активний опір дроселя або, при необхідності, додатково уведений активний опір до складу фільтра для одержання необхідної фільтрації вихідної напруги ПЧ, ω – кутова швидкість вектора напруги u .

Моделюванням встановлено, що попереджувальний компенсатор працездатний у діапазоні частот від 0 до 50 Гц, при цьому має похибку за амплітудою 3%. Розроблене рішення відрізняється алгоритмічною простотою від прототипу, в якому вирішується система диференціальних рівнянь 5-го порядку та залучені 2 додаткові ПІ-регулятори.

При синтезі фільтрів однофазних та двофазних сигналів вважалося, що трифазні вихідні сигнали ПЧ з ШІМ, приведені до еквівалентних двофазних, мають вигляд

$$x_m = x + x_0 + \gamma, \quad (17)$$

де $x = [x_1, x_2]^T$ - вектор гармонічних складових вхідного вектора сигналів $x_m = [x_{1m}, x_{2m}]^T$, $x_0 = [x_{01}, x_{02}]^T$ - вектор постійних складових, $\gamma = [\gamma_1, \gamma_2]^T$ - вектор високочастотних шумів. Задача полягає в усуненні впливу шумів γ шляхом фільтрації, оцінюванні x_{01}, x_{02} та подальшу компенсацією їх впливу з метою одержання оцінювань x_1, x_2 .

Розроблено два блоки оцінювання головних гармонік і постійних складових двофазних зашумлених сигналів у реальному часі. Перший описується виразами:

$$W_f(p) = \frac{k_f}{T^2 p^2 + 2dT p + 1}; \quad k_f, T > 0, \quad (18)$$

$$x^* = W_f(p)x_m, \quad (19)$$

$$x' = J\hat{\omega}x^*, \quad (20)$$

$$*_x^* = -J\hat{\omega}^{-1}x', \quad (21)$$

$$\hat{x}_0^* = k_f^{-1}(x^* - *_x^*), \quad (22)$$

$$\hat{x}_0 = \begin{cases} \hat{x}_0^*, & |\hat{\omega}| > \omega^*, \\ x_0^{B3} = \hat{x}_0^*, & |\hat{\omega}| = \omega^*, \\ x_0^{B3}, & |\hat{\omega}| < \omega^*, \end{cases} \quad (23)$$

$$\hat{x}^* = x^* - \hat{x}_0, \quad (24)$$

$$\hat{\omega} = \frac{x'^T J \hat{x}^*}{|\hat{x}^*|^2} \quad (25)$$

де $W_f(p)$ - передатна функція аналогового фільтра, x' - вектор похідної відфільтрованої змінної, $*_x^*$ - інтеграл від x' , \hat{x}_0^* - оцінка постійної складової, \hat{x}_0 - вихідна змінна блоку запам'ятовування, $\hat{\omega}$ - оцінка кутової частоти вихідного сигналу, ω^* - межове значення кутової частоти, нижче якого $\hat{x}_0 = const$, x_0^{B3} - значення оцінки постійної складової з блока запам'ятовування.

Другий метод, більш простий, описується виразами (18)-(20), (22)-(25) та

$$W_{lpf}(p) = \frac{*_x^*}{x'} = T_{lpf}(T_{lpf}p + 1)^{-1}, \quad (26)$$

де T_{lpf} - постійна часу інерційної ланки.

Блок запам'ятовування дозволяє зберігати раніше отримані результати оцінювання для роботи в межах нульової швидкості. Чисельним моделюванням встановлено, що в діапазоні частот від 50 Гц до 8 Гц похибка не перевищує 1% у динамічних і статичних режимах.

Для оцінювання постійної складової однофазного сигналу було розроблено два спостережники й фільтр. Перший спостережник описується виразом:

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + L(C\hat{x} - y), \quad (27)$$

$$\text{де } \hat{x} = \begin{bmatrix} \hat{x}_0 \\ \hat{x}_1 \\ \hat{x}_2 \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\omega \\ 0 & \omega & 0 \end{bmatrix}, \quad C = [1 \quad 1 \quad 0], \quad L = \begin{bmatrix} l_0 \\ l_1 \\ l_2 \end{bmatrix}, \quad x_1 = X \cos \omega t - \text{вхід-}$$

ний сигнал, а $x_2 = X \sin \omega t$ додаткова змінна, $y = x_0 + x_1$ - сигнал з каналу вимірювання, l_0, l_1, l_2 - коефіцієнти підсилення спостережника.

Редукований спостережник описується виразами:

$$\dot{\hat{q}} = r - L_q y, \quad \dot{r} = (A_q + L_q C_q) r + [B_q - (A_q + L_q C_q) L_q] y, \quad (28)$$

$$\text{де } \hat{q} = \begin{bmatrix} \hat{x}_0 \\ \hat{x}_2 \end{bmatrix}, \quad A_q = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -\omega & 0 \end{bmatrix}, \quad L_q = [l_{q1} \quad l_{q2}]^T, \quad C_q = [0 \quad -\omega], \quad B_q = \begin{bmatrix} 0 \\ \omega \end{bmatrix}.$$

Моделювання редукованого спостережника показало, що сигнал із частотою $\omega = 50 \text{ с}^{-1}$, амплітудою $X = 1$, зсувом $x_0 = 0,5$ оцінюється за 0,14 с.

Фільтр для оцінювання постійної складової описується виразами:

$$\hat{x}_1 = \frac{T_1 p}{T_1 p + 1} y, \quad \hat{x}_0 = y - \hat{x}_1, \quad \hat{x}_{0f} = \frac{1}{T_2 p + 1} \hat{x}_0, \quad v = y - \hat{x}_{0f}, \quad (29)$$

де $y = x_0 + x_1$ - вимірювання, T_1, T_2 , - постійні часу фільтрів, v - оцінювання корисного сигналу x_1 . Моделювання фільтра з тими ж вихідними параметрами показало, що час оцінювання становить 3 с. Розроблений фільтр дозволяє знайти постійну складову без використання частоти сигналу.

Четвертий розділ «Моделювання системи векторного керування з використанням розроблених блоків» включає в себе дослідження і перевірку системи ВК шляхом моделювання розроблених рішень у складі системи ВК з використанням інжекції для ідентифікації параметрів.

Був проведений огляд і аналіз відомих елементів (блоки білого кольору на рис. 1), виходячи з алгоритмічної простоти методів, і діапазону, у якому метод працює, та наведений опис роботи системи ВК в цілому. Моделювання проводилось для АД типу А2–81–4 потужністю 40 кВт. У програму були введені обмеження струму і ефекти, що імітують ШІМ. Такт розрахунку системи становив 200 мкс. Паразитні постійні складові в каналах вимірювання струмів були прийняті 6,7% і 4,0% від номінальних вимірюваних величин. Параметри інжектуємої складової становили $I_{inj} = 0,04 I_{ном}$, $\omega_{inj} = 5$ рад/с. Дослідження проводились при кутових швидкостях

тях ротора 150, 50, 1, 0 рад/с, що відповідають 100%, 33,3%, 0,67%, 0% від номінальної. Кутова швидкість ротора АД розраховувалась з урахуванням в реальному часі постійної часу кола ротора, що ідентифікується початкове значення якої було задано з 5% відхиленням від реального значення.

Проведене моделювання системи ВК при наявності пасивного LC-фільтру на виході ПЧ підтвердило тезу, що без використання попереджувального компенсатора система стає нестійкою при швидкості ротора більшій 60% за номінальну. Це пояснюється тим, що з ростом частоти фазовий зсув напруги двигуна відносно програмного стає недопустимим для стійкої роботи системи керування. При застосуванні попереджувального компенсатора система ВК стабільно працює у всьому діапазоні змінення кутової швидкості ротора в зазначених режимах. Розроблена комп'ютерна модель ВК АЕП системи зрошення з новими рішеннями дозволила визначити її статичні та динамічні характеристики, наведені на рис. 2.

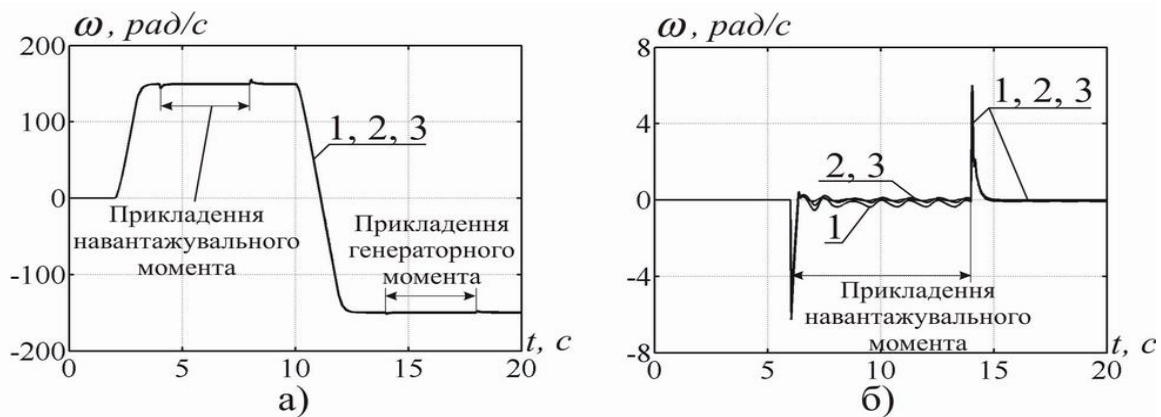


Рис. 2. Результати моделювання кутової швидкості ротора при $\omega_p = 150$ рад/с (а) та $\omega_p = 0$ рад/с (б).

Встановлено, що похибка оцінювання швидкості ротора, викликана наявністю інжекції на нижчій швидкості - не більше 35%, на вищій - не більше 0,5%. Аналіз динаміки системи ВК показав достатню для систем зрошення швидкодію, а також підтвердив, що швидкодія системи ВК практично не залежить від швидкості ротора, при прикладенні моменту опору різної величини. Цього результату вдалось досягти завдяки синтезованому адаптивному спостережнику (14), (15). Отримано тривалість перехідного процесу – 0,46–1,0 с в діапазоні кутових швидкостей ротора від нульової до номінальної при прикладенні номінального моменту опору. Величина провалу швидкості при тих самих умовах становить 6,0–6,3 рад/с (номінальна кутова швидкість ротора 152 рад/с). При прикладенні моменту опору 38% від номінального в діапазоні кутових швидкостей ротора від 1 рад/с до номінальної отримано тривалість перехідного процесу – 0,35–0,6 с. Величина провалу швидкості при цьому становить 2,4–3,0 рад/с.

Моделюванням було підтверджена готовність системи ВК з розробленими рішеннями до експериментального дослідження.

П'ятий розділ «Експериментальне дослідження вдосконаленої системи векторного керування» присвячений проведенню лабораторно-промислового дослідження та польовим випробуванням з метою визначення точності регулювання АЕП з системою ВК і використанням розроблених алгоритмічних блоків.

Попереджувальний компенсатор спотворень статорної напруги АД, які вносяться силовим LC-фільтром, випробовувався в складі системи керування ПЧ типу ПЧ5-D2-640/380/50-070-B00-УХЛ4 номінальними струмом 640 А, напругою 380 В, виробництва «НВП Перетворювач-комплекс» в комплекті з вихідним LC-фільтром VW3A5210 фірми Schneider Electric (рис.3). ПЧ випробовувався за затвердженою програмою та методикою приймально-здавальних випробувань заводу-виробника. В результаті застосування попереджувального компенсатора, ПЧ з вихідним LC-фільтром забезпечив точність регулювання швидкості ротора 2%, діапазон регулювання швидкості 2:1, коефіцієнт нелінійних спотворень вихідної напруги 8%. Без використання попереджувального компенсатора вихідна напруга мала субгармоніки, що призводило до коливань швидкості впритул до неприпустимих 10%.

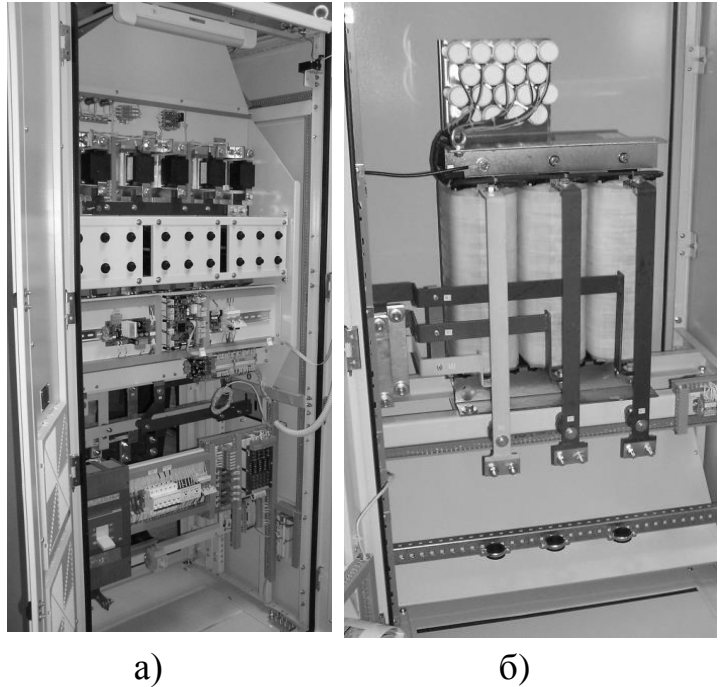


Рис. 3. Загальний вигляд ПЧ5-D2-640/380/50-070-B00-УХЛ4 (а) з LC-фільтром VW3A5210 (б).

Система векторного керування з розробленими блоками, у вигляді алгоритму в різницевих рівняннях, була реалізована на спеціальній платі керування, організованій на процесорі LPC4357 (сімейства ARM Cortex-M4/M0 фірми NXP Semiconductors), спеціально розробленої «НВП Перетворювач-комплекс» для перетворювачів частоти серії ПЧ5 з векторним керуванням, проходила лабораторно-промислові випробування на двомашинному стенді з асинхронним двигуном МТФ112-6 5 кВт, і двигуном постійного струму (ДПТ) 2ПБ160МГ 2,5 кВт (рис. 4).

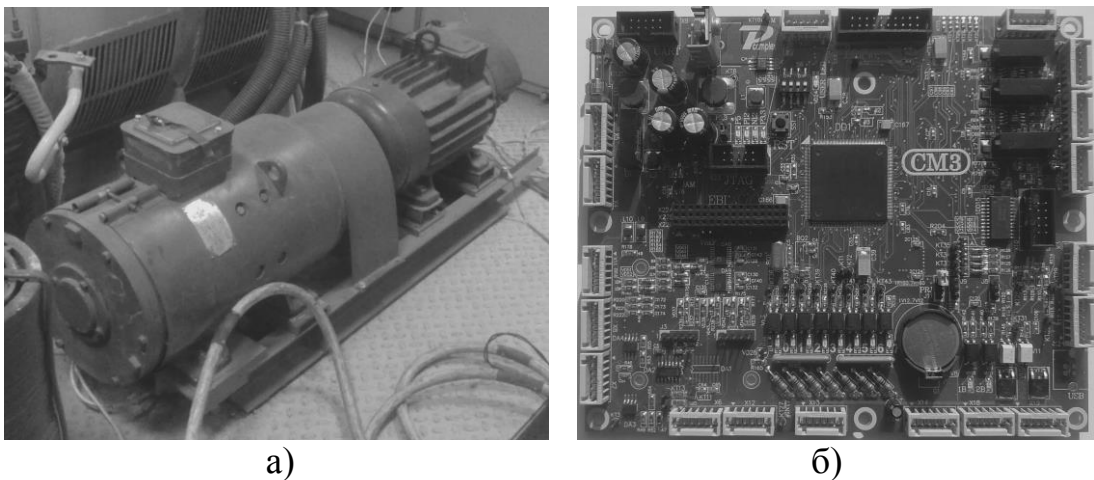


Рис. 4. Загальний вигляд двомашинного стенда (а) та плати керування ПЧ (б).

За допомогою ДПТ реалізовувалася навантажувальна характеристика насоса. Перевірка роботи системи ВК здійснювалась на кутових швидкостях від

10 до 100% від номінальної з кроком 10%. При роботі системи ВК в режимі підтримки швидкості на систему керування ДПТ надходило завдання на ступеневу зміну моменту, що дорівнювало 30% від номінального. Оцінювання похибки підтримки кутової швидкості відбувалося шляхом зіставлення обчислюваної швидкості системою ВК та датчиком швидкості на валу типу OCD-CAA1B-1213-C100-CRW фірми Fraba (похибка 0,3%).

Проведено окреме експериментальне дослідження аналого-цифрових адаптивних фільтрів трифазних сигналів, що використовувалися з метою прямого виміру статорної напруги з подальшим виділенням її першої гармоніки без змінювання фази і амплітуди, що вносяться аналоговими фільтрами в каналах вимірювання.

Були здійснені польові випробування вдосконаленої системи ВК в системі крапельного зрошення на площі 15 га СФГ «Міраж» (м. Орхів Запорізької області). Була розроблена електрична принципова схема керування асинхронним електроприводом. Використовувався ПЧ з АД відцентрового насоса потужністю 15 кВт в системі замкненої за тиском (обов'язковий раніше гідравлічний регулятор тиску з системи був виключений). Загальний вигляд комплектного електропривода номінальними струмом 32 А, напругою 380 В наведено на рис. 5.

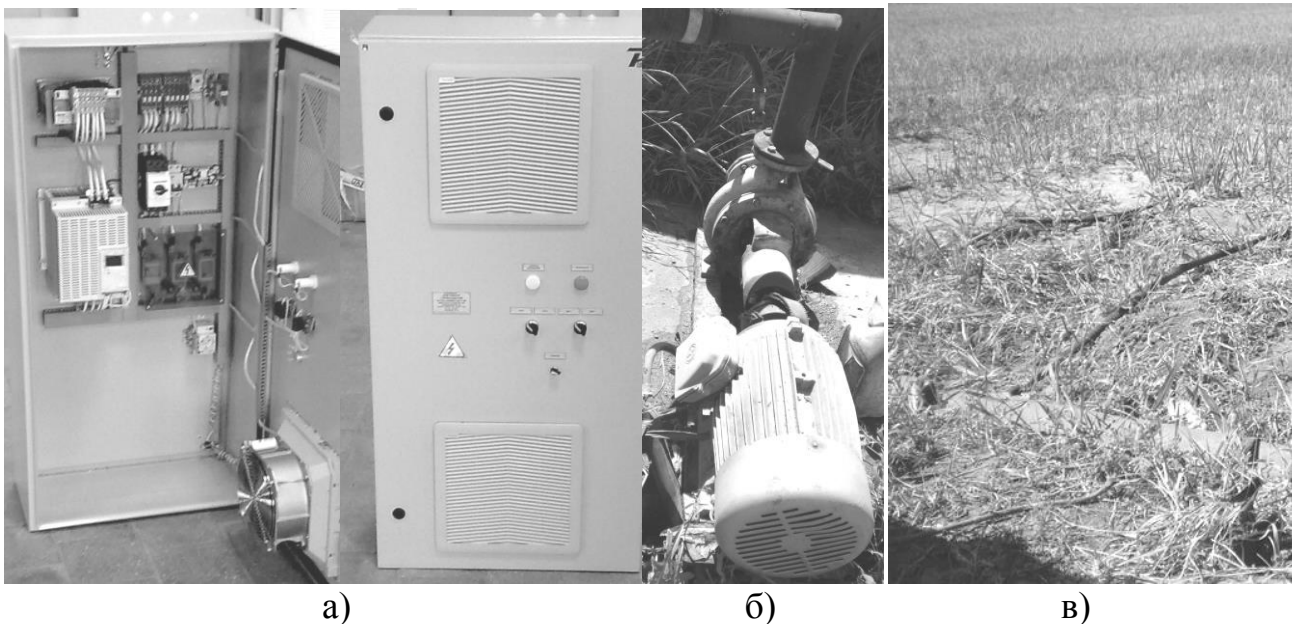


Рис. 5. Загальний вигляд шафи ПЧ (а), АД з насосом (б), системи зрошення (в).

Навісна шафа з ПЧ була встановлена в прибудові біля насосів. На вал двигуна тимчасово був встановлений датчик швидкості OCD-CAA1B-1213-C100-CRW для порівняння обчисленої швидкості ротора системою ВК з реальною. АД розганявся від ПЧ до швидкості, яка забезпечувала відповідний тиск. Для оцінювання динамічних та статичних характеристик в робочих точках, відповідних 50%, 70% і 100% кутової швидкості задавалися збурення у вигляді ступінчастого змінювання завдання тиску на 10%, а також проводилося відкриття/закриття запірної арматури в різних частинах гідросистеми. На рис. 6 наведені результати досліджень вдосконаленої системи ВК.

Аналіз викладених вище результатів дозволяє сформулювати наступне:

1) прийнятні результати, отримані моделюванням і при натурних експериментах проводилися з АД різної потужності (від 5 до 40 кВт), що дозволяє говорити про працездатність вдосконаленої системи ВК та про можливість налаштування її для різної потужності приводного двигуна;

2) кутова швидкість ротора АД розраховувалася з урахуванням ідентифікованої в реальному часі постійної часу ротора, а максимальна похибка в оцінюванні швидкості ротора, викликана присутністю інжекції в досліджуваному діапазоні 50-100% номінальної кутової швидкості, становила:

- при моделюванні, не більше 1,2%;
- при проведенні лабораторно-промислового експерименту, не більше 2,0%;
- при проведенні польових випробувань, не більше 2,7%.

Порівнювати отримані результати вдосконаленої системи ВК з відомими рішеннями дуже складно, з-за одночасного врахування цілої низки факторів в досліджуваній системі, а саме: наявність інжектів складової в намагнічуючій складовій струму статора, ідентифікація у реальному часі постійної часу ротора, фільтрація постійних складових в каналах вимірювання струмів та компенсація збурень, які вносяться вихідним LC-фільтром.

Було порівняно вдосконалену систему ВК з системами, які включають тільки LC-фільтр або інжекцію (рис. 6). Можна зробити такі висновки:

- вдосконалена система має меншу на 0,7% похибку оцінювання швидкості при використанні LC-фільтру;
- вдосконалена система має меншу на 0,5% похибку оцінювання швидкості при використанні інжекції в діапазоні швидкостей, притаманному системам зрощення 50-100%;
- застосовані у вдосконаленій системі ВК методи, які враховують наявність LC-фільтру та інжекції відрізняються значною алгоритмічною простотою, що дозволяє застосовувати менш дорогі процесори та зменшити час налагодження системи ВК.

Натомість можна констатувати прийнятність отриманих результатів виходячи з таких міркувань. Похибка, отримана при польових випробуваннях, пояснюється сумою похибок давачів струму LEM HAL 50-S (максимальна сумарна похибка вимірювань 1,5%), давача тиску XML GM006D21 (0,3%), давача

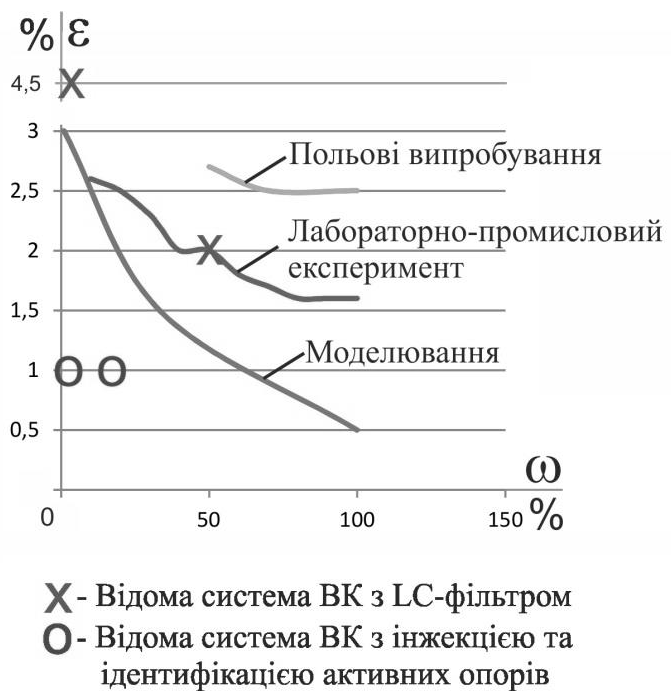


Рис. 6. Залежність похибки від фактичної кутової швидкості ротора АД.

швидкості OCD-CAA1B-1213-C100-CRW (0,3%) і квантування цифрової системи (такт розрахунку 200 мкс), а також похибка оцінювання параметрів. Більш високу точність вимірювань при проведенні лабораторно-промислового експерименту можна пояснити відсутністю давача тиску (і його похибки), а також більш точним настроюванням лабораторного обладнання. Отримана похибка відповідає вимогам керованого привода систем зрошення.

Виконаний розрахунок економічної ефективності впровадження регульованого асинхронного електропривода в системі крапельного зрошення СФГ «Міраж». Економічна ефективність складає практично 30 тисяч гривень на рік на кожній насосній установці. Строк окупності складає не більше 2-х років.

ВИСНОВКИ

На підставі аналізу інформаційних джерел і результатів теоретичних та експериментальних досліджень удосконалення векторного керування асинхронного електропривода насосними агрегатними системами сільськогосподарського зрошення одержано такі наукові результати:

1. Установлено, що для забезпечення ефективного використання насосних агрегатів системи сільськогосподарського зрошення доцільно застосовувати ВК, завданням якого є високодинамічне регулювання тиску поливної води, одночасне керування швидкістю від нульової до номінальної та крутним моментом АД. Керування названими параметрами дозволяє значно зменшити частоту гідроударів, збільшити ККД електродвигуна за рахунок роздільного керування намагнічуючої та моментної складових струму статора і як наслідок, зниження втрат на намагнічування і нагрів.

2. Розроблена комп'ютерна модель ВК АЕП системи зрошення з новими технічними рішеннями дозволила визначити і дослідити її статичні та динамічні характеристики. Аналіз динаміки системи ВК показав достатню для систем зрошення швидкодію, а також підтвердив, що швидкодія системи ВК практично не залежить від швидкості ротора при прикладенні моменту опору різної величини. Тривалість перехідного процесу складає 0,46–1,0 с в діапазоні кутових швидкостей ротора від нульової до номінальної при прикладенні номінального моменту опору. Величина провалу швидкості при тих самих умовах становить 6,0–6,3 рад/с (номінальна кутова швидкість ротора 152 рад/с). При прикладенні моменту опору 38% від номінального в діапазоні кутових швидкостей ротора від 1 рад/с до номінальної отримано тривалість перехідного процесу – 0,35–0,6 с. Величина провалу швидкості при цьому становить 2,4–3,0 рад/с.

Вдосконалена система ВК має меншу на 0,5-0,7% похибку оцінювання швидкості в порівнянні з відомими системами в притаманному для систем зрошення діапазоні швидкостей 50-100%.

3. Розроблено електротехнічний комплекс основою якого є удосконалена схема ВК АЕП насосного агрегату системи зрошення, яка відрізняється від відомих сукупністю пасивного LC-фільтра на виході ПЧ та наявністю інжектованої складової в намагнічуючу складову струму статора. Моделювання статичних та динамічних процесів ВК дозволили:

– розробити алгоритмічно простий попереджувальний компенсатор спотворень статорної напруги, які вносить встановлений на виході пасивний LC-фільтр, застосування якого дозволяє вертати систему ВК до стійкого стану і зберігати показники якості регулювання при похибці, яка не перевищує 3 %;

– розробити алгоритмічні блоки оцінювання синхронної швидкості ротора, які при наявності інжектованого сигналу забезпечують похибку оцінки не більше 5 %;

– розробити адаптивний спостережник кутової швидкості ротора, що враховує змінювання постійної часу ротора при змінюванні температури АД з тривалістю ідентифікації в 60 разів менше порівняно з існуючим методом. Похибка регулювання швидкості насоса не перевищує 1,2 %, оцінювання постійної часу ротора не перевищує 5 %;

– розробити блоки виділення в реальному часі головних гармонік і постійних складових в кожній фазі з похибкою не більше 0,5%, що забезпечує зменшення похибки при обчисленні вектора потокозчеплення, а також і гармонічні коливання моменту і кутової швидкості ротора АД.

4. Результати лабораторно-промислових та польових досліджень підтвердили високі динамічні характеристики системи ВК. Наприклад, максимальна похибка в оцінці швидкості ротора АД, різної потужності (від 5 кВт до 40 кВт), яка викликана наявністю інжекції в необхідному для роботи насоса діапазоні 50-100%, від номінальної швидкості, склала 1,2 %; 2,0%; 2,7% за результатами моделювання лабораторно-промислових і польових досліджень відповідно. Це свідчить про гарний збіг теоретичних і експериментальних даних.

5. Доведено, що вдосконалена система ВК АЕП насосним агрегатом системи зрошення дозволяє отримати якісне керування кутовою швидкістю впритул до нульової, що забезпечує вихідні напруги ПЧ близькі до синусоїдальної форми з коефіцієнтом нелінійних спотворень не більше 8 %, що суттєво зменшує втрати в лінії ПЧ-АД та не погіршує показників ізоляції в порівнянні зі звичайним ШІМ сигналом на виході ПЧ.

6. Основні результати досліджень впроваджені у виробництво, зокрема СФГ «Міраж» м. Оріхів, Запорізької обл. та в навчальний процес Запорізького національного технічного університету при підготовці спеціалістів усіх ОКР за спеціальністю «Електромеханічні системи автоматизації та електропривод». Техніко-економічна ефективність від використання системи ВК АЕП насосного агрегату потужністю 15 кВт на зрошені склала близько 30 тис. грн. на рік.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях

1. Соломаха А.В. Разработка метода упреждающей компенсации искажений статорного напряжения АД, вносимых выходными силовыми фильтрами / А.В. Соломаха // Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы. – 2008. – №1. – С. 125–129.

2. Соломаха А.В. Разработка методов оценки вектора потокосцепления и его угловой скорости при наличии инжесктивированной составляющей / А.В. Соломаха //

Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: Наукові праці КДПУ. – Кременчук: КДПУ, 2008. – Вип.4/2008 (51). Частина 2. – С.21-24.

3. Соломаха А.В. Формирование системы векторного управления асинхронным приводом с компенсацией неопределенностей / А.В. Соломаха // *Радіоелектроніка. Інформатика. Управління.* – 2008. – №1. – С. 148–153.

4. Зиновкин В.В. Исследование влияния искажений статорного напряжения асинхронного электропривода с выходными силовыми фильтрами / В.В. Зиновкин, В.И. Бондаренко, А.В. Соломаха // *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету.* – Мелітополь: ТДАТУ, 2015. – Вип. 15., Т.2. – 382 с. – С.37-45.

5. Потапенко Е.М. Определение скорости ротора асинхронного двигателя с помощью адаптивного наблюдателя Луэнбергера / Е.М. Потапенко, Е.Е. Потапенко, А.В. Соломаха // *Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету.* – 2005. – № 3. – С. 67–69.

6. Потапенко Е.М. Синтез адаптивных наблюдателей потокосцеплений ротора и статора прямым методом Ляпунова / Е.М. Потапенко, А.В. Соломаха // *Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: Наукові праці КДПУ.* – Кременчук: КДПУ, 2007. – Вип.3 (44). – Ч. 1. – С.25-27.

7. Потапенко Е.М. Синтез и анализ компенсатора пассивного LC-фильтра на выходе преобразователя частоты / Е.М. Потапенко, А.В. Соломаха // *Радіоелектроніка. Інформатика. Управління.* – 2007. – №2. – С. 148–151.

8. Потапенко Е.М. Сравнение перспективных методов оценки вектора потокосцепления асинхронного двигателя / Е.М. Потапенко, А.В. Соломаха // *Сборник научных трудов Днепродзержинского государственного технического университета (технические науки). Тематический выпуск «Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика».* – Днепродзержинск: ДГТУ, 2007. – С. 415–417.

9. Потапенко Е.М. Калибровка датчиков однофазных гармонических сигналов с помощью динамических фильтров / Е.М. Потапенко, А.В. Соломаха, Е.Е. Потапенко // *Радіоелектроніка. Інформатика. Управління.* – 2004. – № 2 – С. 164–167.

10. Потапенко Е.М. Экспериментальное исследование аналого-цифровых адаптивных фильтров трехфазных сигналов / Е.М. Потапенко, А.В. Соломаха, А.В. Савранская // *Електромашинобудування та електрообладнання.* – 2006. – № 66. – С. 271- 272.

11. Потапенко Е.М. Синтез адаптивного фильтра-наблюдателя двухфазного сигнала / Е.М. Потапенко, Е.Е. Потапенко, А.В. Соломаха // *Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: Наукові праці КДПУ.* – Кременчук: КДПУ, 2006. – Вип.3 (38).- Ч. 2. – С.46-48.

12. Потапенко Е.М. Простая система векторного управления асинхронными двигателями с клеммными измерениями / Е.М. Потапенко, Е.Е. Потапенко, А.В. Соломаха // *Вісник Національного технічного університету “ХПІ”. Збірник наукових праць “Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика”.* – Харків: НТУ “ХПІ”. – 2005. – №45. –С.134-136.

13. Информационное обеспечение векторного управления асинхронным двигателем–2 / [Потапенко Е.М., Потапенко Е.Е., Соломаха А.В., Васильева Е.В.] // *Радіоелектроніка. Інформатика. Управління.* – 2005. – №2 – С. 153–158.

14. Потапенко Е.М. Оценка потокосцеплений асинхронных двигателей при наличии погрешностей измерений тока и напряжения / Е.М. Потапенко, А.В. Соломаха, А.А. Куликов // *Радіоелектроніка. Інформатика. Управління.* – 2003. – №2 – С. 159-161.

Статті у закордонних виданнях

15. Potapenko E.M. Development and Study of Filtration Methods for Multi-phase Indeterminate Signals / E.M. Potapenko, E.E. Potapenko, A.V. Solomakha // *Journal of Automation and Information Sciences.* – 2007. – Vol.39, № 12. – P.14–24.

Патенти

16. Пат. 103039 Україна, МПК H02P 21/14. Пристрій керування електродвигуном / О.В. Соломаха (Україна). – №и 2015 06449; заявл. 30.06.2015; опубл. 25.11.2015, Бюл. №22.

Статті в інших виданнях

17. Соломаха А.В. Повышение эффективности асинхронного электропривода технологического комплекса водоснабжения АПК / А.В. Соломаха // *Матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференції пам'яті І.І. Мартиненка «Енергозабезпечення технологічних процесів в агропромисловому комплексі України» (10-14 червня 2015 року).* – Мелітополь: ТДАТУ, 2015. – 94 с.

18. Потапенко Е.М. Определение скорости и постоянной времени ротора асинхронного двигателя с помощью адаптивного наблюдателя / Е.М. Потапенко, Е.Е. Потапенко, А.В. Соломаха // *Матеріали 12-ої міжнародної конференції з автоматичного управління “Автоматика–2005”, 30 травня–3 червня 2005 р.* – Харків: НТУ “ХПІ”, 2005. – Т. 2. – С. 123,124.

АНОТАЦІЯ

Соломаха О. В. Вдосконалення системи керування асинхронним електроприводом в системах зрошення. - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.03 - Електротехнічні комплекси та системи. Таврійський державний агротехнологічний університет, Мелітополь, 2016.

Дисертація присвячена питанням розробки, теоретичного й практичного дослідження нових рішень, спрямованих на підвищення ефективності систем зрошення при використанні ВК АД, силового LC-фільтра на виході перетворювача частоти і інжекції для ідентифікації активного опору ротора.

Удосконалені відомі й синтезовані нові спостережники потокозчеплення ротора, працездатні в діапазоні швидкостей ротора від нульової до номінальної, і точно відтворюють інжектовану складову в оцінці модуля вектора потокозчеплення, що забезпечує більш точне оцінювання активного опору кола ротора.

Модифіковано відомий і розроблений новий блоки оцінювання синхронної швидкості, що мають підвищену точність оцінювання, працездатні в діапазоні швидкостей ротора від 0 до номінальної при наявності інжектованої складової.

Розроблено адаптивного спостережника для оцінювання швидкості й постійної часу ротора, який відрізняється алгоритмічною простотою, зі швидкодією, що не залежить від швидкості ротора.

Розроблено нові блоки оцінювання в реальному часі головних гармонік і постійних складових одно- і двофазних сигналів за «зашумленими» нестационарними сигналами з різними постійними складовими в кожній фазі без інформації про частоту сигналу.

Синтезований алгоритмічно простий попереджувальний компенсатор пасивного вихідного LC-фільтра для корекції в реальному часі програмного сигналу ШІМ.

Досліджена запропонована система ВК АЕП з використанням інжекції для ідентифікації постійної часу ротора. Дослідження було проведено як шляхом моделювання, так і шляхом постановки лабораторно-промислового експерименту та проведення польових випробувань. Дослідження підтвердили високі динамічні характеристики розробленої системи ВК.

Ключові слова: векторне керування, асинхронний електропривод, система зрощення, спостережник, ідентифікація параметрів, фільтрація, широтно-імпульсна модуляція.

АННОТАЦИЯ

Соломаха А. В. Усовершенствование системы управления асинхронным электроприводом в системах орошения. - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 - Электротехнические комплексы и системы. Таврический государственный агротехнологический университет, Мелитополь, 2016.

Диссертация посвящена вопросам разработки, теоретического и практического исследования новых решений, направленных на повышение эффективности систем орошения при использовании ВУ АД, силового LC-фильтра на выходе преобразователя частоты и инъекции для идентификации активного сопротивления цепи ротора.

Усовершенствованы известные и синтезированы новые наблюдатели потокосцепления ротора, работоспособные в диапазоне скоростей ротора от нулевой до номинальной, и точно воспроизводящие инжектированную составляющую в оценке модуля вектора потокосцепления, что обеспечивает более точную оценку активного сопротивления цепи ротора.

Модифицирован известный и разработан новый блок оценки синхронной скорости, обладающие повышенной точностью оценки, работоспособные в диапазоне скоростей ротора от 0 до номинальной при наличии инжектированной составляющей.

Разработан адаптивный наблюдатель для оценки скорости и постоянной времени ротора, который отличается алгоритмической простотой, с быстродействием, не зависящим от скорости ротора. Разработаны новые блоки оценки в реальном времени главных гармоник и постоянных составляющих одно- и двухфазных сигналов с «зашумленным» нестационарными сигналами с разными постоянными составляющими в каждой фазе без информации о частоте сигнала.

Синтезирован алгоритмически простой упреждающий компенсатор пассивного выходного LC-фильтра для коррекции в реальном времени программного сигнала ШІМ.

Упреждающий компенсатор искажений статорного напряжения АД, вносимых силовыми LC-фильтрами, испытывался в составе ПЧ номинальным током

640 А, напряжением 380 В, производства ООО «Научно-производственное предприятие «Преобразователь-комплекс» в комплекте с выходным LC-фильтром.

Система векторного управления с разработанными блоками, была реализована на специальной плате управления, организованной на процессоре LPC4357, проходила лабораторно-промышленные испытания на двухмашинном стенде ООО «Научно-производственное предприятие «Преобразователь-комплекс» с асинхронным двигателем 5 кВт.

Разработанная система управления проходила полевые испытания в сельскохозяйственном хозяйстве «Мираж» г. Орехов Запорожской области с системой капельного орошения, на площади 15 га. Использовался ПЧ с приводным асинхронным двигателем центробежного насоса мощностью 15 кВт в системе, замкнутой по давлению (при этом обязательный гидравлический регулятор давления из системы был исключен).

Выполнен расчет экономической эффективности внедрения регулируемого асинхронного электропривода в системе капельного орошения СФО «Мираж». Экономическая эффективность составляет практически 30 000 гривен в год на каждой насосной установке. Срок окупаемости составляет не более 2-х лет.

Предложенная система ВУ АЭП с использованием инжектированной составляющей в намагничивающую составляющую тока статора, идентификацией в реальном времени постоянной времени ротора, фильтрацией постоянных составляющих в каналах измерения токов и компенсацией возмущений, вносимых выходным LC-фильтром, была исследована как путем моделирования, так и путем выполнения лабораторно-промышленного эксперимента и проведения полевых испытаний. Исследования подтвердили высокие динамические характеристики разработанной системы ВК, которые заключаются в следующем:

- результаты, полученные путем моделирования и натурных экспериментов проводились с АД различной мощности (от 5 до 40 кВт), что позволяет говорить о достаточной работоспособности как собственно системы ВУ, так и о возможности ее настройки при использовании двигателей различной мощности;

- угловая скорость ротора АД рассчитывалась с учетом идентифицируемой в реальном времени постоянной времени ротора, при этом максимальная ошибка в оценке скорости ротора, вызванная наличием инъекции в необходимом для работы ирригационного насоса диапазоне 50-100% от номинальной скорости, составила (1,2; 2,0; 2,7) % по результатам моделирования, лабораторно-промышленного эксперимента, полевых испытаний соответственно.

Ключевые слова: векторное управление, асинхронный электропривод, система орошения, наблюдатель, идентификация параметров, фильтрация, широтно-импульсная модуляция.

ABSTRACT

Solomakha A.V. Improvement of control systems of asynchronous electric drive in irrigation systems. - Manuscript.

Dissertation for a scientific degree of candidate of technical sciences, specialty 05.09.03 - Electrotechnical complexes and systems. Tavria State Agrotechnological University, Melitopol, 2016.

Dissertation is devoted to development of theoretical and practical study of new solutions aimed to improving the efficiency of irrigation systems using vector control of asynchronous electric drive with using power LC-filter at the output of the frequency converter and injection for identify the rotor circuit active resistance.

New rotor flux observers were synthesized, which are efficient in the rotor speed range from zero to rated, and accurately reproduce injected component in the estimation of flux vector magnitude, which provides a more accurate observation of the rotor circuit resistance.

New blocks for synchronous speed evaluation were developed with high accuracy observation, and functioning of the rotor speed range from 0 to rated in the presence of the injected part.

Adaptive observer for speed and the rotor time constant estimating was designed, with algorithmic simplicity and performance which is not depending on rotor speed.

New evaluation blocks for main harmonic components real time estimation in single- and two-phase signals with the "noisy" signals with different constant components in each phase, without information about the frequency of the signal were designed.

Algorithmically simple predictive compensator LC-passive output filter for real time correcting the program signal PWM was synthesized.

The proposed VC system of electric drive with using injection to identify the rotor time constant was studied. The study was conducted both by simulation and by staging laboratory and industrial experiments and field tests. Studies have confirmed the high dynamic performance of the developed VC system.

Key words: vector control, asynchronous electric drive, irrigation system, observer, parameter identification, filtering, pulse width modulation.

Підписано до друку 23.02.2016. Формат 60×90/16.
Папір офсетний. Друк цифровий. Гарнітура Times.
Умовн. друк. арк. 0,9. Тираж 100 прим. Зам. № 134.

Запорізький національний університет

69600, м. Запоріжжя, МСП-41
вул. Жуковського, 66

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи
до Державного реєстру видавців, виготівників
і розповсюджувачів видавничої продукції
ДК № 2952 від 30.08.2007

