

## ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу Соломахи Олександра Вікторовича «Вдосконалення системи керування асинхронним електроприводом в системах зрошення», представлену на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи

### **Актуальність обраної теми**

Для отримання високого вихідного валового продукту в рослинництві застосовуються системи зрошення, для приводу насосних установок яких в основному використовуються асинхронні двигуни. Переважна більшість з них застосовуються в нерегульованому приводі, що призводить до низьких експлуатаційних показників. При застосуванні керованого електропривода можливо досягти енергозаощадження до 60%, значно знизити пусковий та робочий струми асинхронних електродвигунів, тим самим зменшити втрати електроенергії, усунути падіння напруги, коливання швидкості електродвигунів та обмежити можливі гідроудари, а також зменшити непродуктивні втрати води за рахунок зменшеного тиску в гідросистемі, тощо.

На сьогодні для регулювання параметрами асинхронних електродвигунів широко застосовують векторне і скалярне керування. На відміну від скалярного векторне керування дозволяє практично повністю уникнути гідроударів, відмовитись від встановлення дорогих редукторів-регуляторів тиску, отримати якісне керування тиском із швидкодією, досягти значно більшої точності керування та ефективності використання електричної енергії. Тому використання керованого асинхронного електропривода на базі саме векторного керування в системах зрошення АПК, який підвищить ефективність енергозаощадження та експлуатаційні показники при покращенні якості зрошення порівняно зі скалярним, є актуальною задачею.

Дисертаційна робота виконана відповідно до Комплексної Державної програми енергозбереження України, затвердженої постановою Кабінету Міністрів України від 05.02.97р. № 148 та є складовою частиною держбюджетної роботи № 0105U005049 «Дослідження і розробка електромеханічних систем і засобів автоматизації технологічних процесів» 2004-2006рр. Тематика роботи відповідає Закону України від 11.07.2001р. № 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».

### **Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації**

Наукові положення, висновки і рекомендації, які наведені в дисертації, достатньо обґрунтовані та достовірні. Це підтверджено результатами

теоретичних та експериментальних досліджень, а також впровадженням цих результатів у виробництво.

Основні положення дисертаційної роботи доповідались та обговорювались з 2005 року по 2015 рік на наукових конференціях різних рівнів, зокрема на 6 міжнародних.

Сформульовані в дисертації висновки є результатом проведених автором теоретичних та експериментальних досліджень і викладені зрозуміло.

*Перший висновок* зроблено на основі аналізу різних літературних джерел. Здобувачем встановлено, що для забезпечення ефективного використання насосних агрегатів систем зрошення доцільно застосовувати векторне керування, завданням якого повинно бути високодинамічне регулювання тиску поливної води, одночасне керування швидкістю від нульової до номінальної та крутним моментом асинхронного електродвигуна, що дозволить значно зменшити частоту гідроударів, збільшити ККД електродвигуна за рахунок роздільного керування намагнічуючої та моментної складовими струму статора і як наслідок, знизити втрати на намагнічування і нагрів.

*Другий висновок* базується на матеріалах теоретичного дослідження, в результаті яких розроблена комп'ютерна модель векторного керування асинхронного електроприводу системи зрошення з новими технічними рішеннями та достатньою для систем зрошення швидкодією, не залежною від швидкості ротора та моменту опору, яка має меншу на 0,5-0,7% похибку оцінювання швидкості в порівнянні з відомими системами в притаманному для систем зрошення діапазоні швидкостей.

*Третій висновок* ґрунтується на результатах моделювання статичних та динамічних процесів векторного керування на базі розробленого електротехнічного комплексу, в результаті яких отримано алгоритмічно простий попереджувальний компенсатор скривлень статорної напруги, алгоритмічні блоки оцінювання синхронної швидкості ротора, адаптивний спостережник кутової швидкості ротора та блоки виділення в реальному часі головних гармонік і постійних складових в кожній фазі, які дозволяють з незначними похибками (1–3%) контролювати та регулювати швидкість насоса в системі зрошення.

У *четвертому висновку* наведено результати лабораторно-промислових та польових досліджень, які підтвердили високі динамічні характеристики вдосконаленої системи векторного керування. Встановлено, що максимальна похибка в оцінці швидкості ротора асинхронних електродвигунів різної потужності не перевищує 3%, а це свідчить про гарний збіг теоретичних і експериментальних даних.

*П'ятий висновок* заснований на результатах експериментальних досліджень, які довели якісне керування кутовою швидкістю впритул до нульової у вдосконаленій системі векторного керування асинхронним електроприводом внаслідок забезпечення вихідної напруги перетворювача частоти близько до синусоїдної форми з коефіцієнтом нелінійних скривлень не

більше 8%, що зменшує втрати в лінії між перетворювачем частоти та асинхронним електродвигуном і не погіршує строк служби ізоляції.

*Шостий висновок* містить дані про виробничі випробування, які підтвердили економічну ефективність використання розробленої системи векторного керування асинхронним електроприводом системи зрошення.

### **Достовірність і новизна досліджень та одержаних результатів**

Здобувач розробив та виконав програму досліджень щодо удосконалення системи керування асинхронним електроприводом в системах зрошення.

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

Наукова новизна одержаних результатів полягає в тому, що:

- вперше розроблено наукові основи створення систем з попереджувальною компенсацією скривлень вихідної напруги силового пасивного LC-фільтра на виході перетворювача частоти, що дозволяє забезпечити на виході вказаного фільтра напругу без скривлення за фазою і без зменшення амплітуди, 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 перетворювача частоти та наявністю інжектованої складової в намагнічуючу складову струму статора, що дозволило підвищити точність регулювання швидкості ротора;

*зауваження до цього пункту новизни:* нажаль, з матеріалів роботи не зрозуміло, як це, за твердженням здобувача, «дозволило вибрати енергозощаджуючі режими енергоємних виконавчих механізмів в системах зрошення», тому що ніякого обрання енергозощаджуючих режимів енергоємних виконавчих механізмів в системах зрошення в дисертації не проведено;

- отримано раніше невідомі закономірності динаміки асинхронного електропривода при формуванні траєкторії швидкості під час гальмування впритул до нульової та підтриманням відповідного моменту, що виключає різке змінювання витрат води, забезпечуючи підтримку високого ККД двигуна за рахунок роздільного керування складовими струму статора (намагнічуючої та моментної), використання яких дозволило 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.

Новизна запропонованого в дисертаційній роботі технічного рішення щодо пристрою керування електродвигуном підтверджена патентом на корисну модель №и 2015 06449.

### **Значимість для науки та практики виконаної здобувачем роботи**

Метод попереджуючої компенсації був використаний при розробці систем керування перетворювачів частоти з вихідним LC-фільтром, які розробляються та виготовляються на «НВП Перетворювач-комплекс» (м. Запоріжжя). Алгоритми векторного керування з розробленими в дисертації рішеннями реалізовані на процесорі LPC4357 нової плати керування, спеціально розробленої «НВП Перетворювач-комплекс» (м. Запоріжжя) для перетворювачів частоти серії ПЧ5 з векторним керуванням. Ефективність результатів запропонованих науково-технічних рішень підтверджена експериментальними випробуваннями на агропідприємстві СФГ «Міраж» в системі крапельного зрошення площею 15 га. Матеріали даної роботи використовуються в навчальному процесі на кафедрі «Електропривод та автоматизація промислових установок» Запорізького національного технічного університету при підготовці студентів всіх ОКР за спеціальністю «Електромеханічні системи автоматизації та електропривод». Все зазначене підтверджено відповідними актами впровадження.

### **Оцінка структури та змісту дисертації, її завершеності в цілому**

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

У вступі обґрунтовано актуальність теми і значимість наукового завдання, викладено зв'язок роботи з науковими програмами, сформульована мета і основні завдання досліджень, наведена наукова новизна і практичне значення одержаних результатів.

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 векторного керування, працездатної 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 перетворювача частоти.

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

В результаті теоретичних досліджень модифіковано спостережник потокозчеплення ротора шляхом уведення змінного коефіцієнту, що забезпечило його працездатність в діапазоні зміни швидкості ротора від номінальної до нульової і дало змогу виключити диференціювання струму. Розроблено нові працездатні адаптивні спостережники для оцінки векторів потокозчеплення обмоток ротора і статора зі зменшеним об'ємом розрахунків. Шляхом математичного моделювання порівняно отримані спостережники з відомими і встановлено їх краще відтворення фактичного значення потокозчеплення в діапазоні кутової швидкості ротора від номінальної до нульової.

Розроблено блок оцінки синхронної швидкості та адаптивний спостережник оцінки кутової швидкості ротора і постійної часу ротора, які дозволяють підвищити точність їх оцінювання при одночасному зменшенні об'єму розрахунків.

У третьому розділі *«Розробка блоків фільтрації однофазних та багатofазних невизначених сигналів»* розроблено попереджувальний компенсатор скривлень статорної напруги, які вносяться вихідним пасивним силовим LC-фільтром, а також блоки виділення постійних та гармонічних складових з однофазних та двофазних сигналів. В результаті математичного моделювання встановлено, що попереджувальний компенсатор працездатний у діапазоні частот від 0 до 50 Гц, при цьому має похибку за амплітудою 3%. Розроблене рішення відрізняється від прототипу алгоритмічною простотою.

*Четвертий розділ «Моделювання системи векторного керування з використанням розроблених блоків»* включає дослідження і теоретичну перевірку системи векторного керування шляхом моделювання розроблених рішень у складі зазначеної системи з використанням інжекції для ідентифікації параметрів. В результаті теоретичних досліджень визначено, що похибка оцінки швидкості ротора на низькій швидкості сягає 35%, а на високій – не перевищує 0,5%. При аналізі системи векторного керування встановлено її високі динамічні характеристики та достатню для систем зрошення швидкодію, яка практично не залежить від швидкості ротора при різних моментах опорів.

У п'ятому розділі *«Експериментальне дослідження вдосконаленої системи векторного керування»* наведено результати лабораторно-промислового дослідження та польового випробування, які підтвердили як високі динамічні характеристики вдосконаленої системи векторного керування асинхронним електроприводом системи зрошення, так і можливість її налаштування при використанні електродвигунів різної потужності.

Виконано розрахунок економічної ефективності впровадження регульованого асинхронного електропривода в системі крапельного зрошення СФГ «Міраж», яка складає практично 30 тисяч гривень на рік на кожній насосній установці, при цьому строк окупності складає не більше 2-х років.

## **Зауваження по дисертаційній роботі**

*До вступу.*

1. При розкритті актуальності задачі досліджень відсутня чітко окреслена народногосподарська проблема, частину якої автор розв'язує у своїх дослідженнях (до речі, згідно Вимог до оформлення дисертацій та авторефератів дисертацій ця частина вступу повинна мати назву «Актуальність теми», а не «Актуальність задачі досліджень»).

*До першого розділу.*

2. При аналізі методів керування асинхронним електроприводом в технологічних лініях АПК (пункт 1.2) не розглядаються системи прямого керування моментом та потокозчепленням ротора асинхронного електродвигуна, а також системи керування асинхронним електроприводом з апаратами нечіткої логіки.

3. Нажаль, у роботі відсутня зведена інформація у вигляді таблиці або схеми, у якій було б зазначено суть методів автоматизованого керування складними об'єктами, їх переваги та недоліки, з якої чітко б випливали кроки подальшого дослідження.

*До другого розділу.*

4. При обґрунтуванні прийнятих припущень у дослідженні блоків оцінки вектору стану асинхронного електроприводу (пункт 2.1) нічого не сказано про функціональний стан асинхронного електродвигуна. Але протягом року експлуатації може відбутись різка його зміна (щорічно на підприємствах АПК України відмовляють близько 25% електродвигунів внаслідок різних пошкоджень, головним з яких є виткові замикання в обмотці статора), що внесе певні впливи на оцінку вектора стану асинхронного електроприводу, а як це враховується у роботі, особливо при інжекції, не зрозуміло.

5. Моделювання блоків оцінки потокозчеплення (пункт 2.4) та блоків оцінки синхронної швидкості (пункт 2.6) здійснено при постійних значеннях індуктивностей асинхронного електродвигуна (додаток В), хоча вони мають не тільки змінні значення, а й нелінійні. Зазначені вище моделювання не виконані для режиму перевантаження електродвигуна, яке може статись, наприклад, внаслідок виникнення непередбачених різких стрибків тиску в системі зрошення (про які здобувач згадує у підпункті 1.2.3 на стор.21). Це ж відноситься і до інших моделювань, викладених у четвертому розділі (пункт 4.3). Також не зрозуміло, чому при вказаних вище моделюваннях використано перетворювач частоти, який має номінальний струм менший, ніж електродвигун (63 А у перетворювача частоти і 130/75 А у електродвигуна – додаток В).

*До третього розділу.*

6. При розробці попереджувального компенсатора скривлень статорної напруги (пункт 3.1) не наведена методика визначення параметрів вихідного пасивного силового LC-фільтру.

7. При спрощенні рівнянь роботи попереджувального компенсатора напруги (перехід від (3.16) до (3.17)) не обґрунтовано зроблене припущення

щодо співвідношення параметрів вихідного пасивного силового LC-фільтру та еквівалентного RL-навантаження, яким замінено у дослідженні асинхронний електродвигун. До речі, в роботі не вказано, яким саме є це співвідношення.

*До четвертого розділу.*

8. При описанні роботи системи удосконаленого векторного керування (пункт 4.2), а саме блоку 10, зустрічається поняття «програмна кутова швидкість». У роботі відсутнє визначення цього поняття та не наводиться методика визначення вказаної швидкості. Також не зрозуміло, як зазначена швидкість пов'язана з показанням первинного вимірювального перетворювача тиску (рисунок 2.1).

9. У роботі не показано, як розроблена система векторного керування асинхронним електроприводом пов'язана з такими параметрами технологічного процесу зрошення, як вологість повітря, вологість ґрунту, температура повітря, напрям та швидкість повітря, а також чому на функціональній схемі (рисунок 2.1) відсутні первинні вимірювальні перетворювачі вказаних параметрів.

10. Виходячи з мети дослідження, у цьому розділі необхідно було виконати порівняння з енергетичної точки зору удосконаленої системи векторного керування асинхронним електроприводом, яку пропонує здобувач, та існуючих систем векторного керування (або хоч б однієї з них), а не констатувати у першому розділі всім відомий факт про енергетичну перевагу векторного керування над дроселюванням в режимах неномінального навантаження.

*До п'ятого розділу.*

11. При проведенні експериментальних досліджень не зазначено кількість проведених вимірювань за одних умов, не наведено результатів вимірювань (окрім експериментального дослідження аналого-цифрових адаптивних фільтрів трифазних сигналів у пункті 5.3) та не розраховані похибки вимірювань.

12. Польовий експеримент (пункт 5.4) не проведено за умови аномальності напруги живлячої мережі, і взагалі, не зрозуміло за яких параметрів живлячої мережі проводились усі експериментальні перевірки.

*До додатків.*

13. У додатку И не потрібно було дублювати загальновідомі відомості (вирази И.1–И.5 та рисунок И.1), які вже наведено в основній частині роботи.

### **Повнота викладення матеріалів дисертації в опублікованих роботах**

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

Аналіз публікацій здобувача свідчить, що вони всебічно і достатньо повно висвітлюють як зміст роботи, так і наукові положення, висновки та рекомендації, що містяться в дисертації.

**Зміст автореферату** відповідає та повністю відображає основні положення дисертаційної роботи. Структура та оформлення автореферату відповідають існуючим вимогам до його оформлення.

*Зауваження до автореферату і дисертаційної роботи в цілому:* при розшифровці літерних позначень, наведених у математичних виразах, не вказано їх розмірності.

## ВИСНОВОК

Висловлені зауваження не знижують наукове та практичне значення роботи у цілому. Дисертаційна робота Соломахи Олександра Вікторовича «Вдосконалення системи керування асинхронним електроприводом в системах зрошення» є завершеною самостійною науковою працею, в якій отримано нові науково обґрунтовані результати, що в сукупності становлять нове вирішення актуального науково-технічного завдання щодо підвищення експлуатаційних показників систем зрошення за рахунок збільшення точності регулювання та швидкодії асинхронних електроприводів, та відповідає паспорту спеціальності 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи.

За актуальністю вибраного напрямку дослідження, науковою та практичною цінністю отриманих результатів представлена робота відповідає вимогам, що висуваються до дисертацій на здобуття наукового ступеня кандидата наук, викладених у «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України №567 від 24 липня 2013 року, а її автор – Соломаха Олександр Вікторович, заслуговує присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи.

Офіційний опонент  
кандидат технічних наук,  
доцент кафедри електротехніки  
і електромеханіки Таврійського  
державного агротехнологічного  
університету

Вовк О.Ю.



Підпис Вовка О.Ю. завіряю

Начальник відділу кадрів

Терещенко А.В.