

ВІДЗИВ

офіційного опонента на дисертацію
Бібік Олени Василівни

” Розвиток теорії та розроблення засобів підвищення енергоефективності вентильно-індукторних і асинхронних двигунів зі змінним навантаженням”,

яку представлено на здобуття вченого ступеня
доктора технічних наук за спеціальністю
05.09.01 - електричні машини і апарати

У даний час в промисловості, комунальному господарстві, побутовій техніці все більше використовуються системи електроприводу, в яких електричні двигуни працюють зі змінним навантаженням на валу ротора. Характерним прикладом таких систем є системи електроприводу компресорного та насосного обладнання. Робочі режими двигунів у складі систем даного типу є квазісталіми. В таких режимах внаслідок періодичної зміни моменту навантаження виникають значні пульсації частоти обертання ротора, струмів і електромагнітного моменту, що негативно впливає на енергоефективність двигунів і їх надійність. Найбільш часто в приводах насосів та компресорних агрегатів використовуються короткозамкнені асинхронні двигуни (АД). При їх роботі в квазісталіх режимах реальний експлуатаційний ККД може бути значно меншим, ніж номінальний ККД, розрахований за умови сталого режиму роботи двигуна. Проблему підвищення енергоефективності АД, що працюють у складі механізмів з періодичним навантаженням традиційно вирішують шляхом встановлення маховиків на валу ротора, використанням АД з підвищеним ковзанням, регулюванням частоти напруги живлення АД за допомогою перетворювачів частоти (ПЧ).

Окрім АД в зазначених системах електроприводу використовують керувані вентильно-індукторні двигуни з реактивним ротором (ВІД). Вони мають ряд важливих переваг (надійність, технологічність) і завжди працюють в квазісталіх режимах навіть з постійним навантаженням на валу. Але проблемам дослідження регульованих ВІД і АД з ПЧ, оптимізації режимів їх роботи, вирішенню задачі підвищення їх енергоефективності в умовах періодичного навантаження приділена недостатня увага. Тому важливим є вирішення актуальної науково-прикладної проблеми розвитку теорії електричних машин в напрямку обґрунтування концепцій оптимального проектування і керування частотою обертання АД і ВІД для підвищення їх енергоефективності при роботі в умовах змінного навантаження із забезпеченням технічних і технологічних вимог. Саме така проблема розглядається в дисертації, в зв'язку з чим *тема дисертаційної роботи є актуальною.*

Дослідження за темою дисертації проводилися у відповідності до планів робіт зареєстрованих державних НДР, що виконувалися в Інституті

електродинаміки НАН України, в яких Бібік О.В. брала безпосередню участь, як відповідальний виконавець.

Наукова новизна результатів дисертації полягає в розробці методології адаптації асинхронних і вентильно-індукторних двигунів до умов функціонування в режимах роботи з суттєво змінним навантаженням з метою підвищення показників їх енергоефективності. Ця методологія включає в себе: оціночні критерії для достовірного порівняння різних варіантів двигунів, ряд нових математичних моделей для визначення показників двигунів з урахуванням особливостей їх роботи зі змінним навантаженням, розроблені в програмному середовищі Matlab-Simulink комп'ютерні програмні засоби чисельної реалізації розроблених математичних моделей, принципи керування двигунами для стабілізації їх характеристик, метод оптимального проектування двигунів шляхом використання апроксимуючих поліномів, які достовірно відображають функцію мети, тощо. Адекватність та достатня точність результатів математичного моделювання підтверджена порівняльним аналізом розрахункових даних з експериментальними даними проведених досліджень.

Практичне значення отриманих в дисертації результатів полягає в розробці системи розрахункових методик, програмних засобів для математичного моделювання та проектування АД і ВІД, рекомендацій щодо доцільного вибору і подальшого вдосконалення нерегульованих АД для їх роботи в системах зі змінним навантаженням, рекомендації щодо вибору оптимальних кутів комутації ВІД тощо. Практичне значення мають також розроблений дослідний зразок ВІД для використання в комунальному секторі та побутовій техніці, проекти ВІД для електроприводу верстата-гойдалки. Результати дисертації використовуються в навчальному процесі студентів двох вищих навчальних закладів.

Достатній рівень обґрунтованості отриманих наукових результатів та висновків базується на строгості і коректності постановки задачі та виконанні математичних перетворень, використанні сучасних пакетів програм для математичного моделювання, оцінки достовірності результатів моделювання шляхом порівняльного аналізу розрахункових даних з результатами експериментальних досліджень.

Основні результати дисертації опубліковано у 38 друкованих працях, у тому числі 30 статей опубліковано у наукових фахових виданнях, одна – у науковому виданні, 5 тез доповідей, 2 патенти на корисну модель. Автор має 5 публікацій у виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз і 12 публікацій у МНМБ Science Index (Elibrary), 9 статей опубліковано без співавторів. Зміст цих публікацій відповідає темі дисертації, повністю відображає її основні положення та характеризує отримані наукові результати та висновки.

Автореферат у повній мірі відображає основні положення і результати дисертаційної роботи. Основні результати дисертаційних досліджень неодноразово апробовано у доповідях на науково-технічних конференціях. Результати захищеної здобувачем кандидатської дисертації не містяться в

представленій до захисту докторській дисертації.

Дисертаційна робота викладена на 347 сторінках друкованого тексту, складається зі вступу, 7 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та 12 додатків. Обсяг основного тексту дисертації складає 270 сторінок друкованого тексту. Робота ілюстрована 43 таблицями, 98 рисунками. Список використаних джерел містить 256 найменувань, з них 215 кирилицею та 41 латиницею.

Матеріал дисертації викладено у наступній послідовності.

У *вступі* коротко викладені основні параметри дисертації. Зокрема обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету наукових досліджень та завдання дисертації, описано пункти наукової новизни та практичне значення одержаних результатів і інш.

У *Розділі 1* проведено огляд та аналіз роботи АД і ВІД при наявності змінного моменту навантаження на валу ротора, який обумовлений особливостями технологічних процесів робочих механізмів. Показано, що для підвищення енергоефективності електроприводів з таким типом навантаженням доцільно провести оптимізацію конструкції і законів керування зазначеними електродвигунами, що обумовлює прикінцеву мету даного дослідження.

У *Розділі 2* викладено результати розробки засобів математичного моделювання – математичних виразів і співвідношень, які призначені для подальшого дослідження, аналізу і оптимального проектування асинхронних двигунів у квазісталих режимах з урахуванням особливостей навантаження. Запропоновано метод аналізу квазісталих режимів, що базується на розрахунку середніх значень частоти обертання, струмів, моментів тощо на періоді повторення змінного навантаження.

У *Розділі 3* представлено результати розробки математичних моделей та методик проектування вентильно-індукторних двигунів. Зокрема представлені математичні моделі ВІД з урахуванням взаємного впливу двигуна, комутатора, системи керування, періодичного характеру навантаження. Представлено результати вибору оптимальних конфігурацій магнітних систем ВІД на основі критерію забезпечення максимального середнього електромагнітного моменту

У *розділі 4* досліджено режими роботи нерегульованих АД і АД з перетворювачами частоти з періодичним і пульсуючим навантаженням. Представлено результати аналізу значної кількості розрахунків показників АД при різних значеннях параметрів двигунів і характеристик змінного навантаження, які лежать в основі рекомендацій щодо підвищення енергоефективності двигунів.

У *розділі 5* досліджено режими роботи ВІД зі змінним навантаженням. Запропоновано ряд ефективних способів керування ВІД, які реалізується зміною кута комутації та напруги живлення і забезпечують високі значення ККД ВІД у робочих режимах.

У *розділі 6* розглянуто окремі питання оптимального проектування АД і ВІД для електромеханічних систем зі змінним навантаженням. Запропоновано метод оптимального проектування АД, який базується на використанні

отриманих аналітичних залежностей ККД від варійованих конструктивних параметрів. Оптимізацію ВІД запропоновано проводити з використанням залежностей максимального і середнього електромагнітних моментів.

У розділі 7 розглянуто проблему підвищення енергоефективності окремих електромеханічних систем, які працюють в умовах змінного навантаження.

Серед основних зауважень по дисертації, необхідно виділити такі.

1. Робота складається з двох майже незалежних частин, в яких розглядаються два двигуни різного принципу дії – асинхронний двигун і вентильно-індукторний двигун. Ідея поєднання цих частин в одній дисертації ґрунтується лише на наявності в обох двигунах змінного навантаження. Такий підхід має сенс, хоча можливе коло електродвигунів, які можуть працювати на змінне навантаження, можна розширити. Тому доцільно було визначити і системно прописати усі чинники (технологічні, експлуатаційні, діапазон вживаних потужностей, сфери практичного використання тощо), які б підкріплювали логіку спільного розгляду цих двох типів двигунів в одній роботі.

2. В розділі 3.3.2 приведені порівняльні дані однофазного АД і ВІД потужністю 100 Вт, згідно з якими при однаковій потужності ВІД має значно кращі масо-габаритні показники, зокрема зовнішній діаметр ВІД менше на 38%, а маса сталі на 54%. З огляду на стільки різочу перевагу показників ВІД з пасивним ротором перед показниками АД з короткозамкненою обмоткою ротора цей приклад потребує докладного аналізу причин такої переваги, і умов при яких вона отримана. Загалом це питання має більш широкий зміст і важливе практичне значення і у разі позитивної відповіді могло б взагалі зробити доцільною пропозицію щодо широкої заміни в певному сегменті потужності АД на ВІД, але цей висновок потребує більш ретельного аналізу і доказу, чого в роботі немає.

3. В формулі (2.28) для виразу сили зроблена помилка – другий доданок треба писати, як $\omega_r^2 \sin\theta$, а не $\omega_r \sin\theta$. Інакше фізична розмірність цього доданку не відповідає фізичній розмірності сили.

4. В четвертому розділі приведено багато чисельних даних розрахунку показників різних АД при варіаціях моменту інерції рухомої частини приводу і ємності конденсатора, які у цілому узгоджуються з відомими рекомендаціями щодо зменшення пульсацій моменту і швидкості ротора при змінних навантаженнях. З огляду на значну кількість отриманих даних їх доцільно було узагальнити і представити у вигляді універсальних залежностей у відносних одиницях, які були б справедливими для двигунів з широким діапазоном параметрів, наприклад, залежність відносного зменшення швидкості коливань від відносного збільшення моменту інерції тощо.

5. Запропонований метод оптимального проектування АД, що ґрунтується на використанні апроксимуючих поліномів, які достовірно відображають функцію мети, продемонстровано на прикладі оптимізації тільки двох параметрів асинхронного двигуна – довжини пакету статора і числа ефективних провідників в пазу статора. Але, якщо виконувати більш загальне проектування асинхронних двигунів з урахуванням умов їх навантаження, то число

варійованих параметрів стає значно більшим – десять і більше (діаметр статора, числа зубців статора і ротора, повітряний проміжок тощо). Отримання апроксимуючих поліномів з такою кількістю незалежних змінних є складною задачею, яка може не мати вирішення, ефективного з практичної точки зору. Тому такий підхід може бути доцільним лише при локальній оптимізації окремих параметрів, коли усі інші параметри вже вибрані. Загалом узагальнених універсальних рекомендацій щодо вибору конструктивних параметрів, які були б справедливі для широкого кола розглянутих двигунів в роботі не наведено.

6. На стор. 65 дисертації стверджується, що по енергетичним показникам ВІД з пасивним ротором не поступається ВІД з постійними магнітами на роторі, що є суперечливим і дискусійним.

7. В роботі є ряд нечітких з точки зору смислового змісту формулювань, що стосується поняття “математична модель”. Наприклад, формулювання “динамічна математична модель”. Доцільно притримуватися класичного визначення математичної моделі як сукупності математичних рівнянь і співвідношень, які математичними методами визначають характеристики певного об’єкту або окремого фізичного процесу в об’єкті. Слово “динамічна” у формулюванні автора відноситься до слова “модель”, але оскільки у даному випадку модель призначена для дослідження квазісталого або динамічного електромагнітного процесу, то зазначене слово точніше відносити до слова “процес”. Тобто більш точним є формулювання “математична модель динамічного процесу” в об’єкті. Аналогічно нечітким є формулювання “математична модель оптимального проектування”, оскільки оптимальне проектування не є фізичним об’єктом, а лише певною процедурою або технологією синтезу об’єкту з оптимальними характеристиками.

Також не дуже точно називати математичними моделями структури, що розробляються засобами системи Matlab-Simulink, оскільки вони лише чисельно реалізують попередньо сформульовані математичні моделі.

8. Автор обрала не завжди зручний для прочитання спосіб подачі матеріалу в дисертації. Наприклад, важлива для розуміння отриманих результатів математична модель асинхронного двигуна у вигляді системи диференційних рівнянь займає усього 2 сторінки тексту, але була винесена в Додаток В. При цьому в основному тексті дисертації приводяться тривіальні вирази для напруж живлення фаз обмотки статора (2.20), відомі перетворення струмів з двофазної системи координат в трифазну (2.21) тощо. В дисертації наведено велику кількість цікавих результатів розрахунків, які свідчать про величезний обсяг роботи автора, але часто стиль викладання результатів досліджень є в значній мірі констатуючим без докладного пояснення досліджених причинно-наслідкових зв’язків.

Відзначені зауваження носять характер побажань автору при подальшій роботі й у цілому не знижують загальної позитивної оцінки дисертації.

Висновок. Дисертація Бібік О.В. є завершеною науковою працею, яка містить нові науково обґрунтовані результати, що в сукупності вирішують актуальну наукову-прикладну проблему, яка полягає в науковому обґрунту-

ванні методології адаптації асинхронних і вентиляно-індукторних двигунів до умов їх функціонування в електромеханічних системах з суттєво змінним навантаженням з метою підвищення показників їх енергоефективності. Автор переконливо довела можливості значного підвищення енергоефективності електромеханічних систем з оптимізованими двигунами при оптимальному їх керуванні у порівнянні з аналогічними системами традиційного виконання.

Робота має теоретичне значення для науки, результати досліджень використовуються на практиці і отримали позитивні оцінки фахівців.

Прикінцеві висновки дисертанта щодо результатів її роботи є обґрунтованими. Результати дисертаційних досліджень у подальшому можуть бути використані електромашинобудівними підприємствами, науково-дослідними і проектними установами при удосконаленні існуючих та розробці нових електромеханічних систем, які працюють з суттєво змінним навантаженням і характеризуються високими техніко-економічними і експлуатаційними показниками.

Розглянута докторська дисертація повністю відповідає встановленим вимогам п. 10 "Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника", затвердженого постановою Кабінету міністрів України №567 від 24.07.2013 р. (зі змінами від 19.08.2015 р. № 656), які висуваються до докторських дисертацій, а її автор, **Бібік Олена Василівна**, заслуговує на присвоєння ученого ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.09.01 – електричні машини і апарати.

Офіційний опонент:

доктор технічних наук, професор, професор
кафедри електромеханіки Національного
технічного університету України
"Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського"

Васьковський Ю.М.

Підпис Васьковського Ю.М. засвідчую

Вчений секретар Національного
технічного університету України
"Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського"



Холявко В. В.

Лист до СВР
26.10.2020
РА