

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу Бібік Олени Василівни "Розвиток теорії та розроблення засобів підвищення енергоефективності вентильно-індукторних і асинхронних двигунів зі змінним навантаженням", що подана на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.09.01 – електричні машини і апарати

Актуальність теми дисертаційної роботи.

Перспективи підвищення енергетичної ефективності електродвигунів, що працюють у складі обладнання зі змінним навантаженням, полягають в модернізації і оптимальному проектуванні асинхронних двигунів (АД) з врахуванням умов експлуатації та використанні регульованих АД з перетворювачами частоти. На ринку регульованого електроприводу конкуренцію системам ПЧ-АД створюють синхронні двигуни з постійними магнітами (PMSM - Permanent Magnet Synchronous Motors), безконтактні двигуни постійного струму (BLDCM – Brushless Direct Current Motors) та вентильно-індукторні двигуни (ВІД) з реактивним ротором (SRM - Switched Reluctance Motors). Автором обрані для дослідження вентильно-індукторні двигуни типу SRM, дослідження яких інтенсивно проводиться за кордоном і в Україні.

Однак, незважаючи на те, що на сьогоднішній день розроблено наукові основи створення ВІД, існують задачі, які пов'язані з особливістю їх експлуатаційних режимів. Це вимагає уточнення закономірностей протікання електромагнітних і електромеханічних процесів ВІД, що працюють у складі електромеханічних систем з періодичним навантаженням, для формування ефективних робочих режимів із забезпеченням високих значень ККД і зниження пульсацій електромагнітного моменту і частоти обертання ротора двигунів. Виконання цих задач передбачає розроблення математичних моделей ВІД для комплексного дослідження режимів з урахуванням особливостей навантаження. Актуальними є питання оптимального

проектування ВІД, уточнення магнітних втрат, створення та реалізації експериментальних зразків для дослідження робочих режимів при регулювання і стабілізації частоти обертання ротора.

Актуальність роботи підтверджується і тим, що вона пов'язана з виконанням низки науково-дослідних робіт, які виконувались в Інституті електродинаміки НАН України відповідно до планів Держбюджетних НДР, затверджених Президією НАН України.

Оцінка змісту дисертаційної роботи.

Дисертаційна робота Бібік О.В. складається із титульного листа, розширених анотацій на українській та англійській мовах, списку публікацій здобувача, змісту, переліку умовних позначень і скорочень, вступу, семи розділів із висновками по кожному з них та дисертації у цілому, списку з 256 використаних джерел та 12 додатків.

У вступі обгрунтовано актуальність роботи, показано її зв'язок з науковими програмами і темами, сформульовано мету і задачі дослідження, наведено наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів, а також дані про особистий внесок здобувача, апробацію роботи і публікації.

У першому розділі виконано аналіз стану науково-прикладної проблеми зі створення електромеханічних перетворювачів енергії (ЕМПЕ) підвищеної енергетичної ефективності для умов змінного навантаження, окреслено перспективи розвитку регульованих ЕМПЕ. На основі огляду наукових праць обгрунтовано актуальність напрямку досліджень, який полягає в розробці засобів і заходів по підвищенню ефективності вентильно-індукторних і асинхронних двигунів, що працюють у складі систем із змінним навантаженням.

У другому розділі запропоновано загальну структуру математичної моделі для дослідження квазісталих режимів електромеханічних перетворювачів енергії зі змінним навантаженням, яка включає динамічні математичні моделі асинхронних і вентильно - індукторних двигунів, навантаження та забезпечує відповідно розробленому алгоритму розрахунок

інтегральних значень струмів, моментів, частоти обертання ротора та їх пульсацій, втрат, коефіцієнтів корисної дії на періоді повторення, аналіз і порівняння розрахунку квазісталіх режимів з результатами розрахунків усталених режимів зі сталим моментом опору, який дорівнює середньому значенню періодичного навантаження.

Розроблено динамічні математичні моделі для дослідження, аналізу і оптимального проектування нерегульованих асинхронних двигунів і АД з перетворювачами частоти з урахуванням особливостей навантаження. Розроблено комплексну математичну модель насосної установки багатоповерхового будинку, яка враховує зміну мінімального достатнього рівня напору насоса, який відповідає мінімуму втрат енергії у гідравлічних вентилях споживача, що дозволяє дослідити особливості робочих режимів при регулюванні частоти і напруги живлення двигуна з врахуванням нелінійного навантаження та адекватно оцінити енергоефективність насосного обладнання.

У *третьому розділі* розвинуто теоретичні засади проектування і математичного моделювання ВІД з урахуванням навантаження. Запропоновано метод пропорційного перерахунку, що базується на зв'язку енергетичних показників машин базової і нової, геометрично подібної конструкції, та забезпечує скорочення часу вибору варіантів ВІД на етапі попереднього проектування. Розроблено математичні моделі вентильно-індукторних двигунів, в яких враховується взаємний вплив індукторної машини, комутатора, системи керування, періодичного характеру навантаження, з використанням нелінійних залежностей індуктивності фази статора від струму і кута повороту ротора та розроблених алгоритмів регулювання частоти обертання ВІД, що дозволяє проводити комплексні дослідження робочих режимів двигунів і покращувати їх технічні показники.

У *четвертому розділі* за допомогою удосконалених і розроблених математичних моделей досліджено режими роботи нерегульованих асинхронних двигунів, однофазних і АД з перетворювачами частоти з

періодичним і пульсуючим навантаженням, уточнено закономірності зміни часових залежностей струмів, електромагнітних моментів, частоти обертання ротора асинхронних двигунів та розраховано з використанням запропонованого алгоритму їх показники, оцінено розбіжності результатів розрахунків робочих режимів АД з врахуванням періодичного навантаження в порівнянні зі сталим навантаженням. В результаті досліджень за допомогою запропонованого критерію оцінки електромагнітних і електромеханічних процесів інтенсивних квазісталих режимів, науково обґрунтована доцільність оптимального проектування і розробки заходів з підвищення ефективності нерегульованих трифазних і АД з перетворювачами частоти, що працюють зі змінним навантаженням у складі насосів та поршневих компресорів.

У *п'ятому розділі* досліджено особливості режимів вентильно-індукторних двигунів зі змінним навантаженням, підтверджено адекватність математичного моделювання шляхом порівняння результатів чисельних і експериментальних досліджень розробленого зразка ВІД. Запропоновано принцип регулювання частоти обертання вентильно-індукторних двигунів шляхом вибору кута вмикання фазної напруги при постійній зоні комутації за критерієм максимального значення ККД з урахуванням навантаження. Це дало змогу сформувані ефективні характеристики робочих режимів ВІД поршневих компресорів із забезпеченням максимальних значень ККД і необхідного регламентованого рівня пульсацій частоти обертання у робочому діапазоні 1:6 з врахуванням періодичного навантаження.

У *шостому розділі* розвинуто концепцію оптимального проектування, яка базуються на отриманих, з використанням методу планування експерименту, аналітичних залежностях: ККД асинхронних двигунів у квазісталих режимах від конструктивних параметрів, що дозволяє підвищити їх енергоефективність у порівнянні з оптимальним проектуванням у припущенні сталих режимів;

максимального і середнього електромагнітного моментів та його пульсацій вентильно-індукторних двигунів від внутрішнього діаметра

статора і кутових величин полюсів статора і ротора при одиночній симетричній комутації, що дозволяє підвищити ефективність проектування ВІД і отримати оптимальний його варіант із заданим середнім електромагнітним моментом з мінімальними пульсаціями. Підходи апробовано для двигунів поршневих компресорів.

У цьому розділі представлено заходи і рекомендації щодо підвищення енергетичної ефективності і надійності асинхронних і вентильно-індукторних двигунів в експлуатаційних режимах насосних і компресорних установок та систем у цілому.

У висновках сформульовані основні результати дисертаційної роботи.

У додатках наведено перелік публікацій здобувача і відомості про апробацію дисертації, акти впровадження та використання результатів роботи, матеріали щодо чисельних і експериментальних досліджень.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Удосконалено динамічні математичні моделі для дослідження квазісталіх режимів трифазних і двофазних з фазозсуваючими елементами у колі статора асинхронних двигунів шляхом врахування характеру навантаження, інтегральних значень струмів, моментів, частоти обертання та їх пульсацій, втрат і енергетичних показників на періоді повторення, які більш адекватно відображають реальні робочі режими, ніж відомі моделі, і дозволяють проводити їх аналіз за зміни моментів опору і параметрів двигунів.

2. Вперше розроблено математичні моделі для комплексного дослідження частотно-регульованих асинхронних двигунів з врахуванням періодичного навантаження, нелінійності електромагнітних параметрів, несиметрії та несинусоїдності процесів, що дозволяє проводити аналіз робочих режимів поршневих компресорів за зміни частоти і напруги живлення та ступеня їх завантаження.

3. Вперше виявлено з використанням критерію інтенсивних квазісталіх режимів, який запропоновано для оцінки протікання електромагнітних і

електромеханічних процесів та ефективності цих режимів, області критичного зниження ККД (більш ніж на 10%) нерегульованих і частото-регульованих асинхронних двигунів поршневих одноциліндрових компресорів, що науково обґрунтовує необхідність розробки заходів з підвищення енергоефективності двигунів в робочих режимах.

4. Розвинуто концепцію оптимального проектування асинхронних двигунів з врахуванням перехідних процесів за умови змінного навантаження, яка базується на отриманих вперше аналітичних залежностях коефіцієнта корисної дії у квазісталих режимах від конструктивних параметрів та дозволяє підвищити ККД до 10 % за зміни довжини пакета статора і числа ефективних провідників обмотки у пазу статора АД у порівнянні з оптимальним проектуванням у сталих режимах.

5. Розвинуто концепцію проектування ВІД, яка базується на отриманих аналітичних залежностях максимальних і середніх значень статичного електромагнітного моменту двигуна та його пульсацій від внутрішнього діаметра статора та кутових величин полюсів статора й ротора, що дозволяє підвищити ефективність проектування ВІД та зменшити час вибору його оптимального варіанту з забезпеченням мінімальних пульсацій електромагнітного моменту.

7. Розвинуто принципи керування частотою обертання вентильно-індукторних двигунів з періодичним навантаженням та її стабілізації шляхом зміни напруги живлення і кутів комутації, що дозволяє формувати енергоефективні робочі режими. *Вперше* розроблено принцип регулювання частоти обертання ВІД одноциліндрових поршневих компресорів за зміни напруги живлення і кутів комутації із забезпеченням максимальних значень ККД і необхідного регламентованого рівня її пульсацій у робочому діапазоні з врахуванням періодичного навантаження.

8. Науково обґрунтовано доцільність врахування періодичного навантаження при розрахунках відносних пульсацій частоти обертання ротора ВІД за її зміни у квазісталих режимах. *Вперше* встановлено, що для

ВІД герметичних поршневих компресорів: розбіжність результатів розрахунку з періодичним і постійним навантаженням (середнє значення періодичного і постійного навантаження однакові) знаходиться у межах 10 ... 90 % для діапазону частоти обертання 1:6; коефіцієнт корисної дії в робочому режимі з номінальним навантаженням більше на 4...6% в порівнянні з асинхронним однофазним двигуном.

9. Науково обгрунтовано оптимальні режими роботи АД насосної установки багатоповерхового будинку при регулюванні частоти і напруги живлення з врахуванням особливостей навантаження шляхом чисельних досліджень за допомогою розробленої математичної моделі з використанням критерію комплексної оцінки енергоефективності цієї системи, який враховує її гідравлічні опори і необхідний мінімальний напір в залежності від витрат згідно добового графіку водопостачання, що дозволяє підвищити енергоефективність ЕМС до 23 % в порівнянні з нерегульованим АД.

Обгрунтованість і достовірність наукових результатів, висновків та рекомендацій базується на аналізі науково-технічних джерел за даною проблемою, коректній постановці завдання дослідження, коректному використанню теорії електричних машин, методів математичного моделювання, співставленні результатів чисельних та експериментальних досліджень.

Практична цінність отриманих результатів.

Дисертація Бібік О.В. має чітко виражену практичну направленість. Розроблено заходи щодо оптимального проектування асинхронних двигунів, що працюють у складі систем зі змінним навантаженням, із забезпеченням підвищення ККД в робочих режимах. Розроблено методичні і програмні засоби покращення характеристик робочих режимів АД при регулюванні частоти і напруги живлення з врахуванням характеру навантаження герметичних поршневих компресорів та насосної установки багатоповерхового будинку.

Розроблено заходи щодо керування ВІД одно - і двоциліндрових поршневих компресорів, що забезпечують при зміні напруги живлення і кутів комутації максимальні значення ККД та необхідний рівень пульсацій частоти обертання в робочому діапазоні.

Результати роботи використано у вигляді:

– рекомендацій щодо розроблення енергоефективних приводів з різними видами змінних навантажень, у тому числі поршневих компресорів холодильних машин в Українському науково-дослідному інституті електропобутових машин (УкрНДІЕМ) "ВЕСТА" (м. Київ).

– рекомендацій щодо розроблення нового енергоефективного приводу верстатів-гойдалок з ВІД на ПрАТ "ПВІ ЗІТ Нафтогазбудізоляція" (м. Київ);

– підходів до проектування, математичних моделей і методик дослідження режимів роботи ВІД і АД та їх програмних реалізацій при розробці енергоефективних і надійних приводів побутової техніки для курсового і дипломного проектування в Київському національному інституті технології та дизайну (м. Київ);

– математичних моделей і їх програмних реалізацій при виконанні студентами бакалаврських та магістерських робіт, присвячених дослідженню і проектуванню асинхронних двигунів підвищеної ефективності для систем насосного і компресорного обладнання в Національному технічному університеті України "КПІ" ім. Ігоря Сікорського (м. Київ).

Апробація результатів дисертації підтверджується тим, що її основні положення та результати роботи доповідались на міжнародних науково-технічних конференціях і симпозіумах.

Повнота викладення наукових результатів досліджень в опублікованих працях

За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 38 наукових робіт, у тому числі 30 статей у наукових фахових виданнях, п'ять тез доповідей, два патенти на корисну модель. Автор має 5 публікацій, які входять до міжнародних наукометричних баз даних.

Відповідь змісту автореферату основним положенням дисертації

Зміст автореферату ідентичний основним положенням дисертаційної роботи, а його оформлення відповідає чинним вимогам за своїм обсягом, структурою.

Використання у докторській дисертації результатів наукових досліджень захищеної кандидатської дисертації

На захист докторської дисертації не виносяться положення, за якими було захищено кандидатську дисертацію.

Зауваження по дисертаційній роботі

1. Значна частина роботи присвячена розробці та удосконаленню регульованого електроприводу поршневих компресорів, де потребується мінімальне значення пульсацій моменту. Тому не зрозуміло, чому автор для досягнення цієї мети вибрав конструктивне виконання ВІД 6/4, адже відомо, що ця конструкція має значні пульсації електромагнітного моменту у порівнянні з конструкцією 8/6.

2. На стор. 125-126 дисертації наведено порівняння розробленого ВІД з однофазним асинхронним двигуном типу ДАО, який спроектовано багато років тому. При такому порівнянні ВІД є, безумовно, виграшним варіантом. Але, на мій погляд, більш доцільним було б порівняння спроектованого ВІД з сучасним трифазним асинхронним двигуном серії 4А, наприклад, 4А50, який має зовнішній діаметр статора 81 мм, частоту обертання 3000 об/хв та потужність 90 Вт.

3. На стор. 129 (рис. 3.4) та 130 (рис. 3.5) наведено розрахункові залежності моменту ВІД 6/4 від кута повороту ротора при зміні діаметру розточки статора та коефіцієнтів полюсного перекриття статора та ротору. Зона комутації для ВІД 6/4 складає 30 механічних градусів. Але на цих рисунках зона комутації більше, ніж 30 механічних градусів. Як автор може це пояснити ?

4. У п. 6.6.2 дисертації (табл. 6.5) наведено діапазон зміни діаметру розточки статора (незалежної змінної) від 40 до 60 мм. При цьому зовнішній

діаметр статору 108 мм є обмеженням. При такій постановці задачі виникає питання, як при зміні діаметру розточки змінюється геометрія зубцево-пазової зони статору, обмоткові дані, заповнення пазу міддю, рівень насичення магнітної системи тощо. Взагалі, з якою метою брати такий широкий діапазон зміни діаметру розточки статору ?

5. Рівняння, які наведені у п. 6.6.2 та 6.6.3, синтезовано при одному значенні струму в обмотці статору. Якщо струм зміниться, то для аналізу ВІД ці рівняння застосовувати неможливо. Доцільно було б до складу незалежних змінних додати або щільність струму, або струм, що, безумовно, розширило б діапазон застосування подібних регресійних рівнянь.

6. У висновках дисертаційної роботи відсутні рекомендації щодо використання асинхронного і вентильно-індукторного електроприводу для пульсуючого і періодичного навантаження.

7. У дисертації є розбіжності у позначеннях, наприклад: кут повороту ротора позначено θ , в окремих випадках γ (стор. 154, 161, 163, 231); на рис. 6.3 і 6.4 (стор. 231 і 232) позначено η_1 замість $\eta_{кв}$ (стор. 231) і η_c (стор. 232).

Висновок

Дисертаційна робота Бібік Олени Василівни "Розвиток теорії та розроблення засобів підвищення енергоефективності вентильно-індукторних і асинхронних двигунів зі змінним навантаженням" за своїм змістом відповідає паспорту спеціальності 05.09.01 – електричні машини і апарати.

Дисертація є завершеною науковою роботою, у якій вирішена актуальна науково-прикладна проблема розвитку теорії електричних машин в напрямку розроблення математичних моделей, уточнення закономірностей протікання електромагнітних і електромеханічних процесів, розроблення концепції оптимального проектування, принципів керування асинхронних і вентильно-індукторних двигунів зі змінним навантаженням і розроблення заходів для підвищення енергоефективності двигунів і систем на їх основі.

Враховуючи актуальність теми дисертаційної роботи, новизну, теоретичну і практичну значимість виконаних досліджень та отриманих результатів, вважаю, що робота відповідає вимогам п. 10 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України № 567 від 24.07.2013 р., а здобувач Бібік Олена Василівна заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.09.01 – електричні машини і апарати.

Офіційний опонент:

доктор технічних наук, професор,
професор кафедри електричних машин
Одеського національного
політехнічного університету

В.В. Римша

*Відгук
засвідчує*



Римши В.В.

Т.В. Рослова

*Лист до СВР
28.10.2020*

CR