

ВІДГУК

офіційного опонента

на дисертаційну роботу Шихненка Максима Олеговича

**"Стартер-генератор підвищеної енергоефективності на основі
вентильно-індукторної машини",**

що подана на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук
за спеціальністю 05.09.01 – електричні машини і апарати

Актуальність теми дисертаційної роботи.

В наш час електричні машини широко використовуються на транспортних засобах. Одним із завдань, які на них покладаються, є запуск первинного двигуна та генерація електроенергії. Частіше за все в таких об'єктах використовуються дві окремі електричні машини які виконують ці функції – стартер і генератор. Застосовують також стартер-генератори – електричні машини, які під час запуску працюють в режимі стартера, а після запуску – генератора. В такому випадку вдається в певній мірі спростити систему механічної передачі енергії, знизити вагу та габарити установки.

В якості стартер-генератора розглядалися різні типи електричних машин, з яких найбільшого розповсюдження набули стартер-генератори на основі машини постійного струму. Перспективним є використання стартер-генераторів на основі вентильно-індукторних машин. Ці машини мають ряд переваг, серед яких більш проста технологія виготовлення та вище значення ККД ніж у традиційних електричних машин. Застосування вентильно-індукторних стартер-генераторів дозволить забезпечити енерго- та ресурсозбереження за рахунок підвищення ефективності перетворення енергії та безвідмовність роботи завдяки надійності конструкції електричної машини.

При цьому необхідно підкреслити, що незважаючи на перспективність використання вентильно-індукторних машин в якості стартер-генераторів, відомо надзвичайно мало робіт, що стосуються аналізу їх

енергоефективності, впливу параметрів та особливостей керування на електромеханічні процеси в стартерному і генераторному режимах. Для забезпечення енергоефективних режимів роботи вентильно-індукторних стартер-генераторів необхідно розробити ефективні математичні моделі та дослідити вплив параметрів та алгоритмів керування на електромеханічні процеси. Тому розробка математичної моделі для аналізу перехідних і квазіусталених електромеханічних процесів та встановлення принципів формування енергоефективних режимів роботи вентильно-індукторних стартер-генераторів є актуальним науковим завданням.

Актуальність теми підтверджується також зв'язком з науково дослідними роботами які належить до пріоритетних напрямів розвитку науки і техніки відповідно Закону України №2623-III.

Оцінка змісту дисертаційної роботи.

Дисертаційна робота Шихненка М.О. складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку літературної літератури із 117 найменувань. Має обсяг 205 сторінок з них 166 сторінок основного тексту, 5 додатків, 94 рисунки та 5 таблиць.

У *вступі* обґрунтовано актуальність теми, показано зв'язок роботи з науково дослідними роботами, сформульовані мета і основні завдання дослідження, визначено наукову новизну і практичне значення отриманих результатів та особистий внесок здобувача в опублікованих роботах, наведено відомості про впровадження результатів роботи, апробацію та публікації.

У *першому розділі* проаналізовано системи запуску газотурбінних двигунів і електроживлення повітряного судна, встановлено тенденції їх розвитку та визначено критерії щодо стартер-генераторів у складі таких систем. Наведено відомості про різні типи електричних машин, які використовуються в якості стартерів, генераторів і стартер-генераторів.

На основі аналізу літературних джерел визначено сучасний стан наукових робіт, присвячених математичному моделюванню та дослідженню вентильно-індукторних стартер-генераторів.

У *другому розділі* представлено розроблену математичну модель вентильно-індукторного стартер-генератора, що описує його складові: індукторну машину, вентильний перетворювач і систему керування та враховує момент опору характерний для первинного двигуна та параметри акумуляторної батареї. Наведено алгоритми розрахунку процесів вентильно-індукторного стартер-генератора за повною та спрощеною моделями.

У *третьому розділі* наведено результати розрахункових досліджень стартерного режиму вентильно-індукторного стартер-генератора при живленні від АБ у випадку прямих пусків та при обмеженні фазного струму. Встановлено параметри стартер-генератора та принципи керування, що дозволяють забезпечити заданий час пуску, зменшити струми стартер-генератора та підвищити енергоефективність стартерного режиму.

Четвертий розділ присвячено дослідженням генераторного режиму вентильно-індукторного стартер-генератора та розробці принципів стабілізації його вихідної напруги. Наведено зовнішні характеристики генератора за незмінних параметрів системи керування, кутів комутації та рівня фазного струму, обґрунтовано принципи стабілізації вихідної напруги за рахунок регулювання цих параметрів. Розроблено структурні схеми систем керування, які реалізують запропоновані підходи, визначено вплив параметрів стартер-генератора на якість стабілізації вихідної напруги.

Встановлено характер протікання електромеханічних процесів генераторного режиму вентильно-індукторного стартер-генератора. Визначено вплив рівня обмеження фазного струму та параметрів стартер-генератора на електромеханічні процеси процесів збудження вентильно-індукторної машини. Досліджено вплив ємності конденсатора в колі постійного струму на показники якості вихідної напруги та обґрунтовано

мінімальну її величину, яка забезпечує показники якості, що відповідають стандартам.

У *п'ятому розділі* представлено розроблений експериментальний зразок вентильно-індукторного стартер-генератора, структурні схеми системи керування та алгоритми роботи. Підтверджено адекватність математичного моделювання вентильно-індукторного стартер-генератора та ефективність запропонованих підходів до формування процесів пуску в стартерному режимі і стабілізації вихідної напруги регулюванням рівня обмеження фазного струму в генераторному режимі.

У *висновках* відображені основні результати дисертаційної роботи.

У *додатки* внесено список опублікованих праць, акти впровадження результатів дисертаційної роботи, наведено додаткові відомості щодо розрахунку параметрів та втрат вентильно-індукторної машини, представлено імітаційну модель, що була побудована на основі повної математичної моделі та відповідного алгоритму розрахунку.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Розвинуто теорію електромеханічних перетворювачів енергії в напрямку вентильно-індукторних машин шляхом наукового обґрунтування принципів формування перехідних і квазіусталених електромагнітних процесів за зміни параметрів і алгоритмів керування в режимах двигуна і генератора, що забезпечило вдосконалення їх систем керування та підвищення енергоефективності.

2. Вдосконалено математичну модель вентильно-індукторного стартер-генератора, що базується на диференційних і алгебраїчних рівняннях контурів статора, електромагнітного моменту, руху, залежностях індуктивності від кута повороту ротора та струму фази, в якій додатково використовуються розроблені логічні вирази для визначення стану напівпровідникових елементів вентильного перетворювача та рівняння зв'язку між цим перетворювачем, індукторною машиною та елементами кола постійного струму та враховуються втрати в сталі і механічні втрати, що дало

змогу дослідити особливості квазіусталених і перехідних процесів як в стартерному так і в генераторному режимах.

3. Вперше за допомогою запропонованої математичної моделі науково обґрунтовано вплив параметрів вентильно-індукторного стартер-генератора, акумуляторної батареї і обмеження фазного струму на енергетичні показники стартерного режиму та встановлено, що вибір акумуляторної батареї з внутрішнім опором $(1/2 \dots 1/8)R_{AB(ном)}$, коефіцієнта широтно-імпульсного регулювання фазної напруги в межах $0,7 \dots 0,9$ або обмеження фазного струму на рівні $(1,2 \dots 5)i_{\phi(max)(ном)}$ дає змогу формувати перехідні електромагнітні процеси і знизити споживання енергії від акумуляторної батареї відповідно на $1 \dots 5 \%$, $3 \dots 11 \%$ та $5 \dots 21 \%$, відносно номінальних значень і підвищити енергоефективність стартерного режиму.

4. Вперше науково обґрунтовано вплив параметрів і обмеження рівня фазного струму на квазіусталені та перехідні процеси генераторного режиму вентильно-індукторного стартер-генератора та встановлено, що збільшення рівня обмеження фазного струму від значення, що відповідає холостому ходу генератора, на один порядок дозволяє знизити тривалість збудження на два порядки, а зменшення ємності конденсатора в колі постійного струму від $2C_{min}$ до $0,05C_{min}$, вибір акумуляторної батареї з електрорушійною силою $(1/2 \dots 1/4)E_{AB(ном)}$ або з внутрішнім опором $(2 \dots 8)R_{AB(ном)}$ забезпечує зниження витрат енергії акумуляторної батареї при збудженні відповідно в $2,2 \dots 57,9$, $4,3 \dots 19,2$ та $1,1 \dots 1,6$ рази відносно номінальних значень. Обґрунтовано мінімальну величину ємності конденсатора C_{min} в колі постійного струму, яка забезпечує відповідність якості вихідної напруги генератора стандартам.

Обґрунтованість і достовірність наукових результатів, висновків та рекомендацій забезпечується коректністю постановки та розв'язання завдань дослідження, коректним застосуванням фундаментальних положень теорії електромеханічного перетворення енергії, теоретичних основ електротехніки, а також співпадінням результатів дослідження, отриманих

методами математичного та імітаційного моделювання, з експериментальними результатами.

Практичне значення отриманих результатів.

1. Розроблено імітаційні моделі стартер-генераторів на основі вентильно-індукторних машин, які враховують нелінійність магнітної системи, дискретність роботи вентильного перетворювача, механічні втрати, втрати в сталі і обмотках, особливість навантаження первинного двигуна та параметри акумуляторної батареї.

2. Розроблено рекомендації щодо принципів керування вентильно-індукторним стартер-генератором в стартерному режимі, що дозволило забезпечити необхідні тривалість пускових процесів, витрати енергії акумуляторної батареї та знизити різкі стрибки фазних струмів та струмів акумуляторної батареї.

3. Розроблено рекомендації щодо керування вентильно-індукторним стартер-генератором в генераторному режимі при збудженні і зміні навантаження, які забезпечили відхилення рівня вихідної напруги не більше 1...2 % від номінального її значення для всього діапазону навантажень та дозволили досягти зменшення тривалості перехідних процесів.

4. Розроблено експериментальний зразок вентильно-індукторного стартер-генератора та проведено його дослідження в стартерному та генераторному режимах. Отримані робочі характеристики вентильно-індукторного стартер-генератора в генераторному режимі підтверджують ефективність запропонованих принципів регулювання його вихідної напруги зміною максимального значення фазного струму.

5. Результати дисертаційної роботи впроваджені в навчальний процес кафедри електротехніки та електроприводу Київського національного університету будівництва і архітектури та кафедри електромеханічного обладнання енергоємних підприємств Національного технічного університету України «Київський Політехнічний Інститут імені Ігоря Сікорського».

Важливість отриманих результатів для науки полягає у розвитку теорії електричних машин в напрямку розроблення математичної моделі, систем керування, визначення характеру протікання перехідних і квазіусталених процесів та принципів їх формування з врахуванням параметрів і алгоритмів керування в режимах стартера і генератора для підвищення енергоефективності вентильно-індукторних стартер-генераторів.

Апробація результатів дисертації підтверджується тим, що основні положення та результати роботи доповідались міжнародних наукових конференціях.

Оцінка ступеню опублікування наукових результатів. Результати дисертаційних досліджень висвітлені у 11 наукових працях (7 у наукових фахових виданнях України, 3 тези доповідей на наукових конференціях, 1 – патент України на корисну модель) в тому числі 2 публікації у наукових виданнях, включених до міжнародних наукометричних баз даних. Обсяг і рівень висвітлення отриманих наукових результатів відповідає «Порядку присудження наукових ступенів».

Автореферат відповідає змісту дисертації та висвітлює її основні положення.

Оцінка мови, стилю, оформлення дисертації. Дисертація викладена логічно і послідовно, написана технічно грамотно і оформлена акуратно. Ілюстрації інформативні і виконані відповідно діючим стандартам.

Зауваження по дисертаційній роботі.

1. Математична модель стартерного режиму роботи, отримана при ряді припущень, які не впливають на характер електромеханічних процесів, дозволяє з необхідною точністю досліджувати статичні і динамічні характеристики вентильно-індукторного стартер-генератора при електричному запуску. В дисертаційній роботі обгрунтовано прийнято допущення стосовно відсутності взаємодукції між фазами індукторної машини при досить стислому розміщенні обмоток. У загальному випадку поточозчеплення також залежить від впливу на даний контур інших контурів

магнітної системи, а повні індуктивності фази обмотки статора визначають сталу часу перехідного електромагнітного процесу i , відповідно, тривалість електричного запуску вентильно-індукторного стартер-генератора.

2. Аналогічне зауваження стосується відмови від врахування в математичній моделі зміни температури обмоток i , відповідно, їх опору, що приводить до неточного оцінювання динамічних характеристик. Доцільно було б при експериментальній верифікації на дослідному зразку провести реєстрацію зміни температурного стану, відповідний перерахунок активного опору фази обмотки статора індукторної машини з метою визначення дійсного впливу температури на енергетичні показники і тривалість пускового режиму стартера. Не зрозуміло, який саме опір взято для розрахунків в імітаційній моделі (в холодному чи гарячому стані)? Результати такого аналізу дали б можливість скорегувати розроблену «ідеалізовану математичну модель».

3. Не наведені результати польових розрахунків магнітного поля вентильно-індукторного стартер-генератора, а саме максимальні значення індукції в ярмах статора та ротора, в зубцях статора та ротора, що не дає змогу оцінити насиченість системи. В насиченому режимі може сформуватись суттєва розбіжність, особливо в значенні похідної потокозчеплення по куту, що призводить до помилок обчислення електромагнітного моменту і ЕРС.

4. Відсутні рекомендації щодо врахування впливу високочастотних імпульсів струму вентильного перетворювача на характеристики індукторної машини, зокрема на розрахунок магнітних втрат і ККД.

5. У додатку Б «Акти впровадження результатів дисертаційної роботи» наведені лише акти впровадження в навчальний процес. Бажано було б у п.6 «Висновків» вказати конкретну форму використання результатів, враховуючи перелік наукових тем, з якими робота має зв'язок.

6. В тексті дисертації мають місце синтаксичні і орфографічні помилки: автореферат с.14, третій абзац знизу; с.195 дисертації, вираз (В.8) тощо.

Висновок.

Дисертаційна робота Шихненка Максима Олеговича «Стартер-генератор підвищеної енергоефективності на основі вентиляно-індукторної машини» є завершеною науковою роботою, в якій вирішено важливе наукове завдання розроблення математичної моделі для аналізу режимів, визначення принципів формування характеру протікання перехідних і квазіусталених процесів вентиляно-індукторних стартер-генераторів з врахуванням параметрів електромеханічних перетворювачів, спрямованих на підвищення їх енергоефективності.

За актуальністю вибраної теми, достовірністю і обґрунтованістю висновків, науковим та практичним значенням отриманих результатів дисертаційна робота відповідає вимогам "Порядку присудження наукових ступенів" щодо кандидатських дисертацій, затвердженого Постановою КМ України №567 від 24.07.2013 р., а її автор Шихненко Максим Олегович заслуговує присудження йому наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.01 – електричні машини і апарати.

Офіційний опонент:

професор кафедри електротехніки,
електромеханіки та електротехнологій
Національного університету біоресурсів
і природокористування України,
доктор технічних наук, професор

Заблудський М.М.

