

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

ТРЕГУБ МИКОЛА ІЛАРІОНОВИЧ

УДК 621.313.21.001.4(045)

**НАУКОВО-ТЕХНІЧНІ ОСНОВИ
БЕЗТРАНСМІСІЙНИХ ВІТРОЕЛЕКТРИЧНИХ КОМПЛЕКСІВ**

05.09.03 «Електротехнічні комплекси та системи»

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Київ – 2018

Дисертацією є рукопис

Роботу виконано в Національному університеті біоресурсів і природокористування України Міністерства освіти і науки України

Науковий консультант доктор технічних наук, професор,
заслужений діяч науки і техніки України
Козирський Володимир Вікторович,
Національний університет біоресурсів і
природокористування України, директор
Навчально-наукового інституту енергетики,
автоматики і енергозбереження

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Мазуренко Леонід Іванович,
Інститут електродинаміки Національної
академії наук України,
завідувач відділу електромеханічних систем

доктор технічних наук,
старший науковий співробітник
Васько Петро Федосійович,
Інститут відновлюваної енергетики
Національної академії наук України,
завідувач відділу гідроенергетики

доктор технічних наук, професор
Щур Ігор Зенонович,
Національний університет «Львівська політехніка»,
професор кафедри електромехатроніки і
комп'ютеризованих електромеханічних систем

Захист відбудеться «18» грудня 2018 року о 10 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.004.07 у Національному університеті біоресурсів і природокористування України за адресою: 03041, м. Київ, вул. Героїв Оборони, 15, навчальний корпус № 3, кімната 301

З дисертацією можна ознайомитися у науковій бібліотеці Національного університету біоресурсів і природокористування України за адресою: 03041, м. Київ, вул. Героїв Оборони, 13, навчальний корпус № 4, кімната 41а

Автореферат розіслано « » листопада 2018 року

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

А. В. Петренко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Знаковим трендом сучасної енергетики є прогресуюче виробництво поновлюваної енергії для зменшення глобальних проблем використання викопних енергоресурсів. Тому інновація теоретичної і технічної бази для вітчизняних вітроелектричних комплексів належить до «Пріоритетних напрямів розвитку науки і техніки на період до 2020 р.» у Законі України №2519-VI за розділом «Енергетика та енергоефективність».

Технічний рівень традиційних вітроелектричних комплексів на базі трансмісійних генераторних агрегатів і типових систем керування досі не дозволяє ефективно використовувати місцеву енергію вітру у аграрному виробництві України, де на більшості території його середньорічна швидкість не перевищує 4,5 м/с, за якої застосування вітроелектричних комплексів із невисокими технічними показниками вважається економічно недоцільним. Нині розробляються перспективні вітроелектричні комплекси на базі вентильних реактивних генераторів (Switched Reluctance Generators), керованих в режимі максимальної потужності вітрової турбіни. Проте навіть сучасні вітроелектричні установки провідних фірм світу ще проектують на основі традиційної науково-технічної бази, яка потребує оновлення. Зокрема, ще триває пошук ефективних способів підвищення колових швидкостей індукторних елементів безтрансмісійних вітроелектричних установок, збільшення діапазону регулювання потужності генератора в режимі максимального використання енергії вітру одночасно за високої надійності та простоти вітроелектричних систем.

Названі причини дають підстави стверджувати, що *розробка науково-технічних основ нових безтрансмісійних вітроелектричних комплексів є важливою, перспективною і актуальною науково-прикладною проблемою.*

Зв'язок роботи із науковими програмами, планами, темами. Роботу виконано у Національному університеті біоресурсів і природокористування України. Наукові дослідження дисертації були складовою планів науково-дослідних тем: «Розробка вітроенергетичних установок сільськогосподарського призначення для роботи при малих швидкостях вітру», договір Міністерства аграрної політики та продовольства України №64-10/2004 від 1.10.2004 р., номер державної реєстрації 0104U009367; науково-дослідної теми: «Енергетичний аналіз використання виробничих ресурсів і ресурсного потенціалу» Білоцерківського Національного аграрного університету з 2009 до 2014 рр., номер державної реєстрації 0109U003107; держбюджетної науково-дослідної теми Національного університету біоресурсів і природокористування України «Управління споживанням та генерацією енергії на підприємствах агропромислового комплексу на основі концепції інтелектуальних технологій (Smart Grid)», наказ МОН України №1243 від 2014р., номер держреєстрації 0115U003356; науково-дослідної держбюджетної теми 02.5.1 УкрНДПВТ ім. Л. Погорілого з 2014 до 2016 рр. «Обґрунтування параметрів та розробка комбінованих вітросонячних систем різних типорозмірів», номер держреєстрації 0114U005389; держбюджетної науково-дослідної роботи за договором № 110/56-ф на тему: «Розробка теорії структурно-програмного

синтезу гібридних систем електроживлення та їх інтеграція до розподільних електричних мереж в сільських регіонах», номер державної реєстрації 0113U003830.

Мета і задачі досліджень. Метою роботи є розробка науково-технічних основ побудови інноваційних безтрансмісійних вітроелектричних комплексів для підвищення ефективності використання енергії вітру.

Для досягнення визначеної мети вирішували наступні задачі досліджень:

- *проаналізувати* науково-технічні проблеми підвищення енергоефективності вітроелектричних комплексів на базі традиційних електричних машин із типовим каскадом перетворень енергії та розрахувати теоретичні показники мінімізації енергетичних втрат для безтрансмісійних електромеханічних перетворювачів з регульованим електронавантаженням;

- *провести* теоретичні дослідження процесів електромеханічного перетворення енергії вітру на розроблених математичних моделях вітроелектричної системи із керованими електромеханічними перетворювачами індукторного типу в режимі максимального аеромеханічного коефіцієнта потужності з регульованим навантаженням;

- *обґрунтувати* методи побудови дугостаторного індукторного електромехатронного перетворювача із коаксіальним кільцевим ротором, конструктивно інтегрованим з вітровою турбіною та розробити аналітичні методи розрахунку його геометричних параметрів і алгоритм проектування на основі визначеної енергетичної пріоритетності взаємно підпорядкованих вимогам аеромеханічної та електромагнітної систем;

- *теоретично проаналізувати* електромагнітні системи запропонованих типів індукторних дугостаторних електромеханічних перетворювачів з радіально-кільцевим ротором за теорією магнітних кіл у різних режимах роботи та обґрунтувати загальні принципи їх керування і оцінити розрахункові функціональні показники;

- *виконати* за допомогою комп'ютерних програмних комплексів розрахунок польових моделей електромагнітних систем дугостаторних вітроелектричних генераторів з кільцевим ротором та отримати функціональні характеристики і показники використання електротехнічних матеріалів;

- *провести* експериментальні дослідження електромеханічних систем лабораторних установок дугостаторного індукторного генератора і виготовленої за розробленим проектом експериментальної безтрансмісійної вітроелектричної установки та проаналізувати отримані експериментальні результати;

- *розробити* науково-технічні основи проектування безтрансмісійних вітроелектричних комплексів та провести функціональні випробування виготовленого за розробленим проектом типорозмірного експериментального зразка у державній науковій установі по випробуванню техніки і технологій із підтвердженням техніко-економічних показників та висновками і рекомендаціями для серійного виробництва.

Об'єкт досліджень – електроенергетичні процеси електромеханічного перетворення енергії вітру в безтрансмісійних вітроелектричних комплексах.

Предмет досліджень – закономірності впливу функціональних і конструктивних параметрів безтрансмійних вітроелектричних комплексів на енергоефективність процесу електромеханічного перетворення енергії вітру.

Методи досліджень. Теоретичні дослідження виконували на основі базових положень електромеханіки, аеродинаміки та електротехніки методами міжсистемних обмежень відповідно до впливу на енергетичні процеси; аналіз електромагнітних процесів електромеханічної системи проводили за теорією магнітних кіл і польового аналізу на основі рівнянь Максвела методом скінчених елементів у програмних комплексах ELCUT, COMSOL та досліджень імітаційної моделі в пакеті MATLAB/Simulink. Експериментальні дослідження проводили на розроблених лабораторних стендах, а також на виготовленій експериментальній вітроелектричній установці з обробкою числових значень методами математичної статистики із використанням математичних комп'ютерних програм.

Наукова новизна одержаних результатів досліджень

1. Обґрунтовано нову науково-технічну концепцію побудови інноваційних вітроелектричних комплексів на базі безтрансмійних дугостаторних індукторних і вентильно-реактивних генераторів з багатополосним коаксіальним кільцевим ротором на вітровій турбіні, що на відміну від існуючих за однакових умов забезпечує вищу частоту, кращу керуваність та ширший діапазон робочих потужностей.

2. Доповнені теоретичні положення побудови математичних моделей вітроелектромеханічної системи за схемою взаємозалежних зосереджених параметрів аеромеханічної, магнітної та електричної підсистем і обґрунтовано на основі балансу моментів новий принцип адаптивного керування вітроелектричними комплексами.

3. Розроблено новий методологічний підхід до типологічного і конструктивного проектування безконтактних дугостаторних аероелектромеханічних перетворювачів з коаксіальним кільцевим ротором і його феромагнітними полюсними елементами та допоміжним магнітним підвісом у робочому повітряному проміжку на підставі енергетичної ієрархії різносистемних цільових функцій.

4. Уперше встановлені аналітичні залежності енергетичних параметрів електромагнітної системи дугостаторного електромеханічного перетворювача з коаксіальним кільцевим ротором для магнітно не зв'язаних між собою дугостаторних модулів магнітоелектричного та електромагнітного типів, обґрунтовані вирази для розрахунку геометричних параметрів, що розширює науково-технічну базу для проектування безтрансмійних вітроелектричних комплексів.

5. Запропонований новий принцип збільшення потужності низькооберткових електромехатронних систем відповідно до запатентованого способу каскадного електромеханічного перетворення енергії, який базується на бездавачевому принципі координованої взаємодії магнітно незв'язаних між собою статорних модулів з магнітоелектричним та електромагнітним збудженням.

Практичне значення одержаних результатів. Для сучасних технологій проектування досконалих екоенергоджерел нового покоління, орієнтованих на економічно доцільне використання наявних вітроенергетичних ресурсів аграрного виробництва, розроблена методологія побудови електротехнічних комплексів із регульованими безтрансмійними електромехатронними системами на базі дугостаторних індукторних генераторів з коаксіальним кільцевим ротором, інтегрованим з конструкцією вітрової турбіни з допоміжним магнітним підвісом, що забезпечує їх вищу енергоефективність.

Методики розрахунку безтрансмійних дугостаторних індукторних вітроелектричних генераторів з кільцевим ротором передані для використання у конструкторських відділах підприємства енергетичного обладнання ТОВ СП «Укрінтерм», машинобудівних підприємств ТОВ ВФ «Агрореммаш» і ТОВ «Грунттех» із новими технічними рішеннями.

Розроблені та апробовані нові технічні рішення вітроелектричних установок, які використані на стадіях проектування та виготовлення експериментального зразка безтрансмійної вітроустановки для комплектування комбінованих вітросонячних систем різних типорозмірів за науково-дослідною темою УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого з 2014 по 2016 рр. № держреєстрації 0114U005389, а також видані «Рекомендації», затверджені у Міністерстві аграрної політики та продовольства України у 2016 р. За результатами функціональних випробувань експериментального зразка безтрансмійної вітроенергетичної установки БВЕУ-01 затверджений регламентний протокол № 01-21-2016 від 07.11.2016 встановленого зразка з рекомендацією підготовки до серійного виробництва.

Загалом принципова й конструктивна новизна запропонованих способів та пристроїв сформульована і опублікована у 6 патентах на винаходи і 17 на корисні моделі, які використані для проектування та виготовлення обладнання.

Видані методичні вказівки для практичних занять з методиками розрахунків і дослідження характеристик безтрансмійних низькообертових генераторів для вітроустановок та низьконапірних гідроелектростанцій і лабораторний стенд низькообертового аксіального генератора, які впроваджені у навчальний процес магістерської підготовки в ННІ енергетики, автоматики і енергозбереження НУБіП України, а також демонстраційна вітроенергетична установка у Білоцерківському Національному аграрному університеті для проведення практичних занять.

Особистий внесок здобувача. У дисертаційній роботі здобувачем особисто оцінено актуальність науково-технічної проблеми, виконано огляд літературних джерел, сформульовано робочу гіпотезу та розроблено науково-технічну концепцію побудови безтрансмійних вітроелектричних комплексів, запропоновані нові способи і конструкції систем електромеханічного перетворення енергії вітру та розроблені методики визначення їх оптимальних параметрів, проведені теоретичні та експериментальні дослідження розроблених електромеханічних систем коловими та польовими методами; виконане проектування і виготовлення експериментальної установки, підготовлені регламентні функціональні випробування. Спільно з науковим

консультантом зроблений аналіз результатів та перспектив впроваджень. У докторській дисертації наведені результати, які належать здобувачеві у одноосібних та колективних публікаціях, а також повністю відсутні матеріали його кандидатської дисертації.

Апробація результатів роботи. Основні принципові положення й результати теоретичних та експериментальних досліджень доповідались та публічно обговорювалися на щорічних науково-практичних конференціях науково-педагогічних працівників Білоцерківського національного аграрного університету (з 2001 до 2017 рр.), Національного університету біоресурсів і природокористування України (з 2008 до 2017 рр.), на міжнародних науково-технічних конференціях ННЦ ІМЕСГ (щорічно з 2004 до 2016 рр.), УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого (з 2003 до 2017 рр.), на VIII та IX міжнародних конференціях відновлювана енергетика 21 століття АРК Крим 2007 і 2008 рр., на міжнародній науково-технічній конференції Національного авіаційного університету 2013 р., міжнародному науковому семінарі експертів з відновлюваних джерел енергії Національної академії наук Білорусі (2013 р.), науковому семінарі відділу електромеханічних систем Інституту електродинаміки НАН України (2014 р.).

Публікації результатів роботи. Всі основні теоретичні та експериментальні результати наукових досліджень висвітлені загалом у 64 публікаціях, включно у 33 наукових статтях, із яких 28 у фахових виданнях, в тому числі 9 у виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз, матеріалах 6 наукових конференцій та 6 описах до патентів на винаходи і 17 на корисні моделі та 2 рекомендацій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, семи розділів, висновків, списку літератури з 336 джерел, із яких 285 кирилицею і 51 латиномовних, а також 27 додатків. Матеріал роботи викладений на 377 сторінках друкованого тексту, включно 262 сторінки основного, містить 101 рисунок та 10 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність теми, її зв'язок із науковими програмами і темами, визначені мета, об'єкт, предмет, завдання та методи досліджень, наведені наукова новизна і практична цінність результатів роботи.

У першому розділі *«Огляд методів побудови та принципів удосконалення вітроелектричних комплексів»* виконаний аналіз відомих методів побудови вітроелектричних комплексів (ВЕК) із типовими засобами перетворення енергії вітру (ЕВ) та виявлені закономірності підвищення їх технічного рівня на послідовних етапах удосконалення.

Одним із перших визначних прикладів створення та масштабного застосування ВЕК вважаються теоретичні й практичні роботи Paul La Cour (Данія) у кінці ХІХ століття, які дозволили на існуючих тоді конструкціях вітрових млинів забезпечити побудову і використання кількох сотень вітроелектричних установок (ВЕУ) постійного струму потужністю від 5 до 25 кВт для сільського електропостачання.

Відтоді до нинішнього періоду кількома поколіннями вчених та інженерів різних країн зроблені значні теоретичні та конструктивні досягнення у аеродинаміці, а особливо у електротехніці та електронних технологіях. Серед відомих українських науковців, які донедавна працювали і тих, що продовжують різнопланові дослідження ВЕК можна назвати В.В. Атрощенко, А.А. Бриля, П.Ф. Васька, В.М. Головка, Г.І. Денисенка, В.В. Козирського, В.С. Кривцова, С.О. Кудрю, А.А. Люшню, Л.І. Мазуренка, В.С. Подгуренка, В.М. Синєглозова, А.Ф. Шевченка, А.К. Шидловського, І.З. Щура, А.І. Яковлева, О.М. Яхна та багатьох інших вчених, які зробили внесок у розвиток теорії і практики вітроелектричних систем в Україні. Однак у численних вітчизняних та зарубіжних публікаціях концептуальні принципи модернізації вітроелектромеханічних комплексів розглядалися у контексті розвитку традиційних технічних рішень окремих складових аероелектромеханічних систем, залишаючи певні проблемні питання частково, або повністю невирішеними.

Аналіз опрацьованих джерел науково-технічної інформації дозволив для наочної оцінки енергетичних втрат на стадіях приймання та видового і параметричного перетворення ЕВ у електротехнічному комплексі автономних ВЕУ побудувати діаграму (рис. 1). На діаграмі зображені показники енергетичних втрат на різних стадіях перетворень прийнятої ЕВ за теоретичних максимумів (рівень 1) та для порівняння за вищих технічно досяжних показників (рівень 2) залежно від значень ККД пристроїв у складі вітроелектричного комплексу.

Загалом після послідовного каскаду енергетичних перетворень, навіть за високих ККД технічних засобів (ВТ - вітрова турбіна, ТМ - трансмісія механічна, ЕГ - електрогенератор, ВП - випрямляч, АКБ - акумуляторна батарея, І - інвертор, Тр-Л - трансформатор, мережа), для електроспоживання

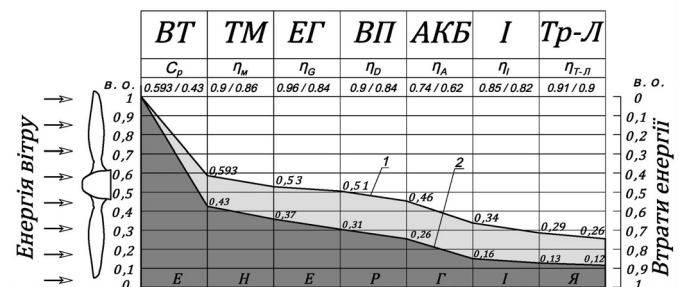


Рис. 1. Втрати енергії у системах ВЕК

може бути використано не більше 12 % від тієї ЕВ, яка проходить через обвіювану площину обертання лопатей вітрової турбіни (ВТ). Тому можна зробити висновок, що мінімізація стадій енергетичних перетворень у ВЕК є важливим завданням; причому найбільший комплекс проблем вирішується за відсутності багатоступінчастих трансмісійних механізмів. Це підтверджує і сучасний досвід переходу, наприклад, європейськими фірмами «Enercon», «Vensys», «Lagerwey», «MP Torres», «Jeumont industrie» та іншими на безмультиплікаторні вітроелектричні системи із багатополюсними синхронними генераторами та інверторами, технічні показники яких швидко прогресують.

Отже, можна зробити наступні загальні висновки щодо сучасного стану вирішення науково-технічної проблеми створення теоретичних та практичних

методів побудови енергоефективних безтрансмійних ВЕК, які необхідні для виготовлення на їх базі інноваційних екоенергоджерел.

1. Досі не знайшли раціонального вирішення проблеми побудови безтрансмійних низькооберткових електромеханічних систем з високою частотою механічної зміни магнітного потоку в робочому повітряному проміжку для отримання номінальних значень напруги за мінімальних робочих швидкостей вітру.

2. Потребує подальшого розвитку методологія визначення оптимальних варіантів виконання безтрансмійних систем на основі енергетичних пріоритетів міжсистемних обмежень аеромеханічної та електромагнітної систем.

3. В межах традиційних конфігурацій електромагнітних систем принципово неможливо реалізувати поєднання функцій допоміжної магнітної підвіски ВТ через кільцевий ротор генератора з максимальною частотою механічної зміни поточкозчеплення і мінімальними масогабаритними показниками та оптимальним використанням електротехнічних матеріалів і постійних магнітів.

4. Принципово неможливо забезпечити електричними машинами традиційних типів режим збільшення потужності електромеханічного генерування з кубічною залежністю від швидкості вітру за оптимального магнітного потоку збудження та числа активних провідників у широкому діапазоні робочих швидкостей вітрового потоку.

5. Потребують удосконалення методи побудови ВЕК, із широким діапазоном регулювання потужності генерування в режимі змінної частоти обертання за максимальної енергоефективності аеромеханічної системи.

Зроблені висновки враховані в процесі постановки задач досліджень та обґрунтування нової концепції побудови безтрансмійних ВЕК на базі дуго-статорних вітроелектричних генераторів з кільцевим ротором.

У другому розділі «Теоретичний аналіз енергетичних та математичних моделей вітроелектромеханічних систем» проаналізовані електромеханічні процеси безтрансмійних ВЕК, побудованих за електричною блок-схемою (рис. 2). Вітрова турбіна ВТ

має кільцевий ротор безтрансмійного електромеханічного перетворювача ЕМ, який сполучений через комутатор КМ, керований програмованим логічним контролером ПЛК, із лініями автономного Z_{H1}^* і регульованого Z_{H2} навантаження. Параметри миттєвої швидкості вітру в систему генерування

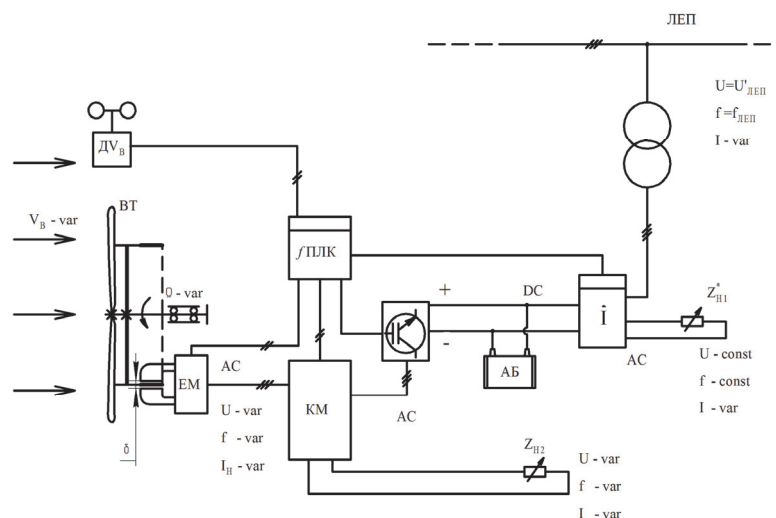


Рис. 2. Електрична блок-схема ВЕК

надходять від електроанемометра DV_6 . Така система ВЕК із гібридним типом інвертора може застосовуватися для живлення автономного навантаження Z_{H1}^* , або для передачі енергії в мережу, в обох випадках із регульованим енергоутилізаційним навантаженням Z_{H2} .

Для побудови та аналізу математичної моделі безтрансмісійної аероелектромеханічної системи була розроблена функціональна параметрична модель, показана на рис. 3. В системі силова функція задана швидкістю вітру (V_B) за умови незмінності стану повітряного середовища, а взаємозалежні аеромеханічна (I), магнітна (II) і електрична (III) підсистеми задані зосередженими функціональними

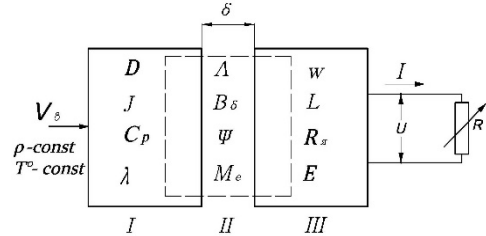


Рис. 3. Модель системи

параметрами: D, J, λ, C_p – відповідно діаметр, момент інерції, швидкохідність та коефіцієнт потужності ВТ; $\Lambda, B_\delta, \psi, M_e$ – відповідно магнітна провідність, індукція, потокозчеплення та електромагнітний момент; w, L, E, R_s, R, I – число витків якірної обмотки статора, індуктивність, ЕРС, внутрішній активний опір якірної обмотки, регульований активний опір та струм навантаження.

Загальний енергетичний процес електромеханічного перетворення у безтрансмісійному ВЕК аероелектромеханічної макросистеми можна описати за допомогою рівняння балансу елементарних змін енергії:

$$\Delta W_{am} + \Delta W_f = \Delta W_{el} (1/\eta), \quad (1)$$

де $\Delta W_{am}, \Delta W_f, \Delta W_{el}$ – елементарні зміни енергії відповідно у аеромеханічній, магнітній та електричній системах; η – сумарний ККД системи генерування, яким кількісно враховані дисипативні втрати енергії.

Модель енергетичного процесу електромеханічного перетворення із одновимірною компонентою обертового руху можна описати відомим рівнянням Лагранжа, яке відповідає принципу Гамільтона за обмеженої кількості параметрів. В даній аероелектромеханічній системі за одновимірного обертового руху енергетичний процес відповідно описується диференціальним рівнянням балансу моментів:

$$M_p(\theta) = 0,5 I^2 w^2 d\Lambda / d\theta + J d\Omega_r / dt + k_m d\theta / dt + k_{жс}(\theta), \quad (2)$$

де $M_p(\theta)$ – механічний момент вітрової турбіни, $(0,5 I^2 w^2 d\Lambda/d\theta)$ – електромагнітний момент, створений струмом I якірної обмотки із числом витків w за відомої функції координатної зміни магнітної провідності Λ ; $(Jd\Omega_r/dt)$ – момент інерції обертових мас системи; $(k_m d\theta/dt)$ – момент опору сил тертя; k_m – зведений коефіцієнт тертя, а $k_{жс}(\theta)$ – складова жорсткості системи, $k_{жс}$ коефіцієнт крутильної жорсткості, які задають числовими наближеними значеннями.

Уданій електромеханічній системі електромагнітний момент можна визначити для генератора індукторного типу, за певної величини струму якірної обмотки, за гармонійною зміною магнітної провідності, а відтак

(оскільки $\psi = Iw^2\Lambda$, $aL=\psi I$) і потокозчеплення або індуктивності електромагнітної системи, за виразами:

$$M_e = dW_f / d\theta = 0,5I^2w^2d\Lambda / d\theta = 0,5Id\psi / d\theta = 0,5I^2dL / d\theta \quad (3)$$

де dW_f – елементарні зміни енергії магнітного поля; I , w – відповідно струм та число витків нерухомої якірної обмотки дугового статора, $d\Lambda/d\theta$ – похідна скалярної функції магнітної провідності за кутом θ повороту ротора.

Для аеромеханічної системи з кільцевим ротором дугостаторного генератора без врахування пружної деформації конструкції, вся кінетична енергія W_k механічної системи акумулюється у загальній обертовій масі, а загальний вираз енергетичного балансу моментів з названими умовами буде:

$$M_p = M_e + Jd\Omega / dt. \quad (4)$$

В режимі генератора механічний вітроприводний момент M_p визначається заданими зосередженими параметрами аеромеханічної системи і швидкістю вітру за формулою:

$$M_p = P / \Omega = 0,125\pi D^2 \rho V_g^3 C_p D / (2V_g) = 0,0625\pi D^3 \rho C_p \lambda^{-1} V_g^2, \quad (5)$$

де P , Ω – відповідно механічна потужність та кутова швидкість ВТ.

Виразивши складові рівняння (4) через зосереджені параметри всієї макросистеми без врахування втрат, отримаємо загальне параметричне рівняння балансу механічного, електромагнітного та динамічного моментів:

$$0,0625\pi D^3 \rho V_B^2 C_p \lambda^{-1} - jd\Omega / dt = 0,5I^2w^2d\Lambda / d\theta, \quad (6)$$

Математична модель балансу моментів за одночасного генераторного і коригувального режимів теоретично можлива, якщо у рівняння (6) у правій частині записати з протилежним знаком електромагнітний момент за виразом (3), створений, наприклад, обмоткою окремого модуля електромагнітного типу дугового статора з відповідною індуктивністю, що можна описати виразом:

$$0,0625\pi D^3 \rho V_B^2 C_p \lambda^{-1} - jd\Omega / dt = 0,5I^2w^2d\Lambda / d\theta \pm 0,5I_e^2dL / d\theta, \quad (7)$$

де I_e – струм обмотки електромагнітного модуля статора, що діє у коригувальному режимі, який надходить із якірної обмотки магнітоелектричного модуля, тоді можна записати $I_e = I_a - I_n$. У розробленій електромеханічній системі змінюється лише коригувальний момент під час миттєвих вітрових поривів і пауз, а основний режим обох типів статорних модулів генераторний з однаковими знаками моментів. Схема узагальненого бездавачевого електромехатронного перетворювача із встановленими на дуговому статорі магнітоелектричним і електромагнітним модулями та кільцевим ротором зображена на рис. 4.

Статор такої електричної машини виконаний модулями двох типів: магнітоелектричного 1 і електромагнітного 2, поздовжні осі їх магнітних потоків відповідно d_m і d_e , а на роторі встановлені

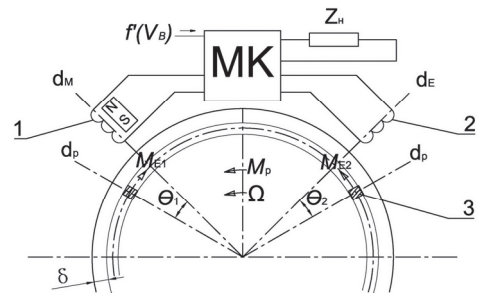


Рис. 4. Схема узагальненої електромеханічної системи

ферромагнітні елементи 3, які мають осі максимальної провідності d_p . Напрямок обертання з кутовою швидкістю Ω , а також напрями дії вітроприводного моменту M_p , електромагнітного моменту магнітоелектричного модуля M_{e1} в режимі генератора і електромагнітного моменту M_{e2} в коригувальному режимі.

Функціональна взаємодія модулів цих типів забезпечується за допомогою мікроконтролера MK із врахуванням інформативного параметру $f(V_e)$ миттєвої швидкості вітру. На схемі показані відносні просторові положення ферромагнітних полюсних елементів кільцевого ротора і обмоток дугового статора із відповідними кутами моментів у генераторному і коригувальному режимах. З цього рисунка видно, що кути θ_1 і θ_2 моментів різних модулів дугового статора принципово можуть мати однакові або різні знаки осі d_p відносно осей d_m і d_e магнітних потоків відповідних обмоток, що співпадають з положенням стійкої рівноваги за максимальної магнітної провідності кола. У зображеному положенні на полюсні елементи ротора момент магнітоелектричного модуля в режимі генератора діє з відставанням на кут θ_1 протилежно напрямку обертання, а момент електромагнітного модуля принципово можна змінювати координованими імпульсами струмів обмотки не лише за величиною, але і за напрямом, наприклад, як показано із випередженням на кут θ_2 .

Керування системи забезпечується підтриманням оптимальної частоти обертання ВТ за бездавачевої ідентифікації координатного положення ротора. Тобто за принципом функціонування і взаємодії таких модулів через мікроконтролер це є індукторно-вентильно-реактивна електромехатронна система.

Математична модель електромехатронного перетворювача із керованою компонентою електромагнітного моменту описуватиметься наступною системою рівнянь:

$$\begin{cases} M_p = P / \Omega = 0,0625\pi D^3 \rho C_p \lambda^{-1} V_B^2 \\ M_{E1} = 0,5 I^2 w^2 d \Lambda / d\theta \\ M_{E2} = \pm 0,5 I_e^2 dL / d\theta \\ M_p - Jd\Omega / dt = M_{E1} \pm M_{E2} \end{cases} \quad (8)$$

де M_p – механічний момент вітрової турбіни, M_{E1} – електромагнітний момент індукторного магнітоелектричного модуля, M_{E2} – електромагнітний момент вентильно-реактивного електромагнітного модуля.

Математична модель відображає фізичний процес підтримання балансу моментів регулюванням струму навантаження у якірній обмотці індукторного магнітоелектричного модуля за незмінного потоку збудження від постійних магнітів та змінного моменту в електромагнітному модулі в режимі коригування обертів. Технічна можливість коригувального режиму з приводним напрямом моменту електромагнітного модуля за відсутності струму навантаження магнітоелектричного модуля також необхідна для реалізації короткочасного активного пуску ВЕУ за мінімальної швидкості вітру.

Процес електромеханічного перетворення ЕВ у моделях макросистеми зображений алгоритмічною схемою стадій перетворення силової функції (рис. 5.).

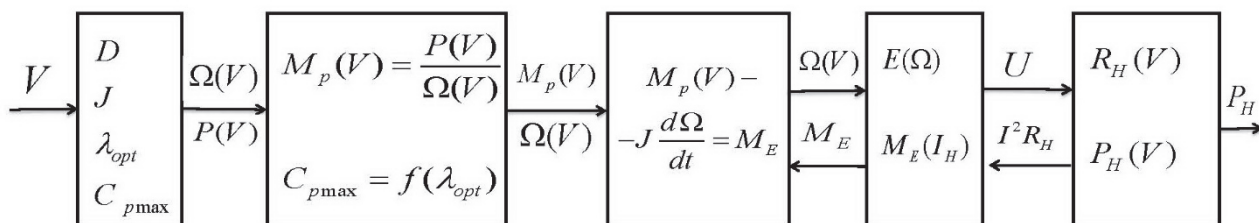


Рис. 5. Структурно-алгоритмічна схема БЕК

Результатом аналітичних досліджень є створення теоретичних положень побудови безтрансмісійних БЕК на підставі розроблених математичних і функціональних моделей та обґрунтованих принципів, структур і схем керування процесами електромеханічного перетворення ЕВ.

У третьому розділі «Методи розробки систем і конструкцій безтрансмісійних вітроелектричних комплексів» теоретично обґрунтовані методи міжсистемних пріоритетних обмежень конструктивних параметрів безтрансмісійних вітроелектромеханічних комплексів з коаксіальним кільцевим ротором дугостаторного генератора за ступенем впливу на енергетичні процеси. Для всіх генераторів індукційного типу існують обмеження максимальних значень індукції та густини струму і числа витків обмотки, а в даному випадку і мінімальної частоти обертів, тому допустимі значення цих параметрів детерміновані.

За таких умов для безтрансмісійної ВЕУ єдиний геометричний фактор збільшення колової швидкості, це радіус r кільцевого ротора. Тоді цільова функція отримання максимальної ЕРС буде: $r \rightarrow \text{MAX}$, що має однозначний варіант встановлення полюсних елементів ротора на кінцях лопатей, тобто, $r \rightarrow R$, що доцільно лише для малогабаритних ВТ, а тому є потреба обґрунтування обмежувальних умов та принципів побудови різномасштабних комплексів. Був запропонований варіант виконання коаксіального кільцевого ротора з поєднанням функціональних елементів у одній конструкції ВТ (рис. 6). У запропонованій ВЕУ горизонтально-осьового типу є основні лопаті 1 та кільцевий ротор 2 електрогенератора із дуговим статором 3, закріпленим на поворотній щоглі 4, встановленій у вертикальному вальницькому вузлі 5 на верхньому краю вертикальної стійки 6, закріпленої внизу до фундаментної основи 7. Відстань від горизонтальної осі до кінця лопатей відповідає радіусу R кола їх обертання. Кільцевий ротор має радіус r , який залежний від довжини основних лопатей. Принцип орієнтації ВТ за напрямом вітру базується на зміщенні площини обертання лопатей відносно центру поворотної вертикальної осі. Така конструктивна схема принципово дозволяє без жодних передавальних механічних ланок і додаткового

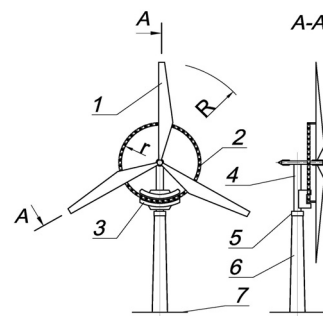


Рис. 6. Безтрансмісійна ВЕУ

вальнищевого вузла отримати високі колові швидкості руху полюсних елементів ротора, а внаслідок цього і частоти зміни потокозчеплення та величини ЕРС.

Крім того за коаксіальної конструкції кільцевого ротора дугостаторного генератора є принципова технічна можливість використання допоміжного магнітного підвісу корпусу ВТ за рахунок притягувальної сили робочого магнітного потоку через повітряний проміжок між ротором і дуговим статором, що може забезпечити часткове, або повне розвантаження вальнищевого вузла і горизонтальної осі від гравітаційної складової обертових мас.

Одночасно кільцевий корпус ротора, встановлений на спільній з лопатями осі, підвищує загальну механічну міцність конструкції у порівнянні з традиційним одноточковим консольним кріпленням лопатей та дозволяє виготовляти їх більш тонкими з вищою аеродинамічною якістю.

Не менш важливою перевагою є принципова технічна можливість використання корпусу кільцевого ротора у якості механічного акумулятора енергії, який суттєво зменшує вплив нерівномірності миттєвих швидкостей вітру.

Конструктивні форми електричних машин визначаються конфігурацією ділянки магнітного кола ротора, яка найкоротша із прямолінійним напрямом магнітного потоку в роторі кільцево-циліндричного типу. Проте встановлення кільцевого ротора навіть обтічної форми на ВТ впливає на аеродинамічні показники. Тому всі розглянуті варіанти геометричних конфігурацій електромеханічної системи оцінювали цільовими функціями різносистемних обмежень за ієрархічною підпорядкованістю, показаною на рис. 7.

Аналіз принципів технічних можливостей різних варіантів дозволив визначити загальні контури конфігурації оптимізованої електромагнітної системи дугостаторного вітроелектричного генератора з кільцевим ротором.

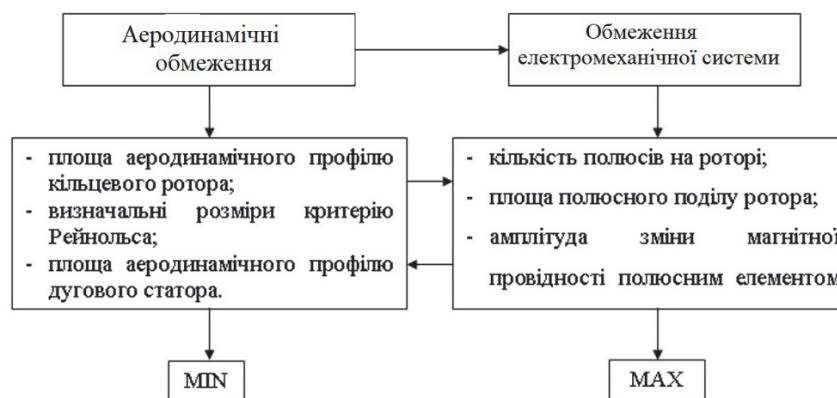


Рис. 7. Схема підпорядкування обмежень

Найповніше відповідає вимогам систем геометрична конфігурація кільцевого ротора у формі коаксіального порожнистого циліндра з робочими повітряними проміжками між магнітопроводами дугового статора і полюсними елементами кільцевого ротора на внутрішній доцентровій і зовнішній відцентровій поверхнях. Одночасно в межах конструктивної схеми вирішувалися завдання мінімізації магнітного моменту ротора і витрат магнітного матеріалу в електромеханічній системі.

Раціональним варіантом побудови електромеханічної системи індукторного типу із постійними магнітами на статорі визначено конфігурацію біпакетного модуля, схематично зображеного на рис. 8, де магнітопровід розгалужений на два пакети 1 і 2 відносно спільних ділянок 3, до яких приєднані полюси N і S постійного магніту. Кільцевий ротор складається із однакових за просторовими розмірами b, h, ℓ діамагнітних 4 і магнітопровідних 5 ділянок з полюсним поділом τ . На кожному з пакетів намотані якірні обмотки відповідно 6 і 7 для індукування у них ЕРС e_1 і e_2 у протифазі. Показаний фрагмент кільцевого ротора з внутрішнім радіусом r , орієнтованого відносно напрямку вітру V_0 , а між статором виконаний робочий повітряний проміжок δ . У цій магнітоелектричній системі очевидне ефективне використання магнітного матеріалу порівняно з монопакетним варіантом, де магніт є послідовною ланкою магнітного кола.

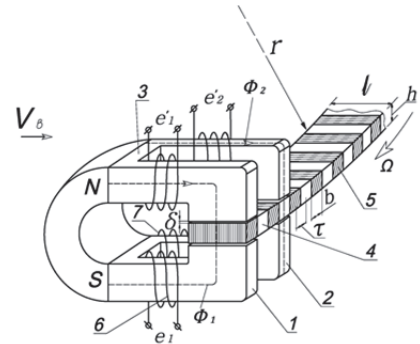


Рис. 8. Магнітоелектричний біпакетний модуль

Інший статорний модуль електромагнітного типу, який зображений на рис. 9, із монопакетним магнітопроводом 1, між виступами якого проходять вказані ділянки 2 і 3 кільцевого ротора; на магнітопроводі намотана обмотка 4. Значну перевагу монопакетний модуль статора має під час роботи його в режимі вентильної реактивної електричної машини, оскільки повністю відсутня міжмодульна взаємодія та непродуктивні міжмодульні магнітні потоки. Методика визначення оптимальних геометричних параметрів відповідала розробленому алгоритму, у якому встановлена послідовність оцінки впливу кожного розміру на показники цільових функцій. Найбільший вплив на головні показники аеромеханічної і електромагнітної систем мають геометричні параметри кільцевого ротора, тоді як форма і розміри дугового статора є підпорядкованими. Однак одні й ті ж геометричні параметри є функціональними елементами одночасно для аеромеханічної і електромагнітної систем, які мають альтернативні цільові функції.

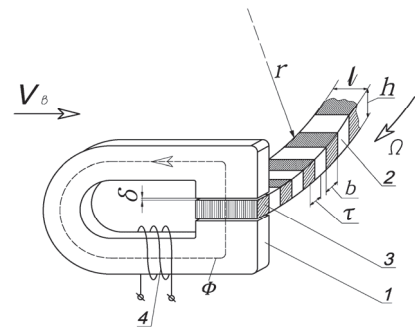


Рис. 9. Електромагнітний монопакетний модуль

Тому окремо оцінювався вплив одного і того ж геометричного параметра на показники спочатку аеромеханічної, а потім електромагнітної системи і методом суміщення визначалися інтервали його компромісних значень. У циліндричній системі координат розміри елементів ротора, показані на рис. 8 і 9, визначаються: b – довжиною дуги, заданої радіусом r і центральним кутом полюсного поділу; ℓ – осьовою довжиною; h – різницею радіусів внутрішньої доцентрової і зовнішньої відцентрової поверхні кільцевого ротора. При цьому вітровий потік відносно ротора має аксіальний, а магнітний потік – радіальний напрями.

Варіативним геометричним параметром кільцевого ротора визначено радіальний розмір h , а іншим розмірам b і ℓ були задані фіксовані значення, які визначаються полюсним поділом та площею перетину магнітопроводу. Вплив на аеродинамічні показники оцінювався силою аеродинамічного опору кільцевого профілю:

$$F_a = 0,5 \cdot C_x \pi h (2r + h) \rho V^2 = 0,5 \cdot C_x \pi \rho V^2 (2rh + h^2), \quad (9)$$

де C_x – коефіцієнт сили лобового опору (довідникові значення); r – радіус внутрішньої доцентрової поверхні кільцевого ротора.

Даний вираз показує, що сила аеродинамічного опору кільцевого ротора має, за умови $r \gg h$, слабо виражену параболічну залежність від радіальної висоти h та набуває мінімальних значень біля початку координат.

Одночасно за незмінної температури та в'язкості повітря, критерій Рейнольдса для ділянки кільцевого ротора описуватиметься виразом:

$$Re = V \cdot h / \eta_{II}, \quad (10)$$

де V – швидкість вітру; η_{II} – кінематична в'язкість повітря.

Обмежувальним параметром прийняте відоме критичне значення критерію Рейнольдса, що характеризує перехід потоку із ламінарного у турбулентний.

Вплив цього ж розміру на показники електромагнітної системи для отримання максимальних значень ЕРС можна оцінити за цільовою функцією:

$$\Delta\Lambda(h) = (\Lambda_{\max} - \Lambda_{\min}) \rightarrow MAX, \quad (11)$$

де Λ_{\max} – максимальне значення магнітної провідності кола, яке буде у положенні повного перекривання феромагнітним елементом ротора проміжку магнітопроводу статора і розраховуватиметься за виразом:

$$\Lambda_{\max} = (R_\delta + R_\phi)^{-1} = (2\delta / \mu_o b\ell + h / \mu_\phi b\ell)^{-1} = b\ell (2\delta / \mu_o + h / \mu_\phi)^{-1}, \quad (12)$$

де R_δ , R_ϕ – магнітні опори відповідно повітряного проміжку і феромагнітного елемента ротора; μ_o , μ_ϕ – магнітні проникності відповідно повітряного проміжку і феромагнітного елемента ротора.

Оскільки $\mu_\phi \gg \mu_o$, то Λ_{\max} залежить у найбільшій мірі від розмірів робочого повітряного проміжку δ , а радіальна висота h феромагнітного елемента ротора на цей показник практично не впливає.

Мінімальне значення магнітної провідності Λ_{\min} за повного перекривання цього ж проміжку немагнітопровідною ділянкою ротора висотою h і без врахування явища випинання силових ліній магнітного поля буде визначатися подібним виразом:

$$\Lambda_{\min} = (R_\delta + R_D)^{-1} = (2\delta / \mu_o b\ell + h / \mu_D b\ell)^{-1}, \quad (13)$$

де R_D – магнітний опір немагнітопровідної ділянки полюсного поділу ротора, μ_D – магнітна проникність діамагнітного матеріалу немагнітопровідної ділянки полюсного поділу ротора, яку для розрахунків з достатньо високою точністю можна вважати $\mu_D = \mu_o$; тоді мінімальна магнітна провідність розраховується

простою залежністю від геометричних розмірів полюсного поділу τ та константи магнітної проникності повітря:

$$\Lambda_{\min} = b\ell\mu_0 / (h + 2\delta). \quad (14)$$

Аналіз виразів максимальної і мінімальної провідності показує, що на початку координат вони мають однакові максимальні значення, тому достатньо дослідити лише останню залежність. За відсутності магнітного насичення магнітопроводу залежність мінімальної магнітної провідності буде подібна до зміни провідності магнітного кола зміною розміру повітряного проміжку. Теоретична залежність магнітної провідності від радіального розміру h кільцевого ротора за фіксованого значення робочого повітряного проміжку $\delta=0,001\text{м}$ для різних значень площі нормального перетину полюсного поділу наведена на рис. 10. Із графіка видно, що магнітна провідність ділянки кільцевого ротора індукторного генератора залежить прямо пропорційно від площі нормального перетину полюсного поділу і обернено пропорційно від розміру h . Тобто за більших площ полюсного поділу ротора магнітна система менш чутлива до величини робочого повітряного проміжку. Слід зазначити, що за менших площ полюсного поділу ротора однакові значення мінімальної провідності будуть за менших значень радіальної висоти h . Навіть якщо враховувати вплив випинання магнітного поля поза немагнітною ділянкою кільцевого ротора, вплив радіальної висоти h матиме подібні закономірності.

На графіку (рис. 11) для фіксованої площі полюсного поділу ротора побудовані вказані залежності зі спільним аргументом критеріального розміру. Слід зазначити, що співвідношення між розмірами не може бути довільним, оскільки площею перетину полюсного поділу обмежується допустима величина магнітної індукції.

Отже, оптимізаційним параметром масогабаритних показників слід вважати радіальний розмір h , оскільки він найбільш суттєво впливає на процеси обох систем. На графіку показано метод визначення меж оптимальних значень радіального розміру в інтервалі між h_1 і h_2 , які є коренями систем рівнянь магнітної провідності з критерієм Рейнольдса і силою аеродинамічного опору за фіксованих розмірів b , ℓ і δ та розрахункової швидкості вітру.

Результати аналітичних досліджень дозволили розробити загальні методи побудови безтрансмісійних ВЕК на базі дугостаторних генераторів, з кільцевим ротором, конфігурація і розміри якого враховують обмеження одночасно аеромеханічної та електромагнітної систем.

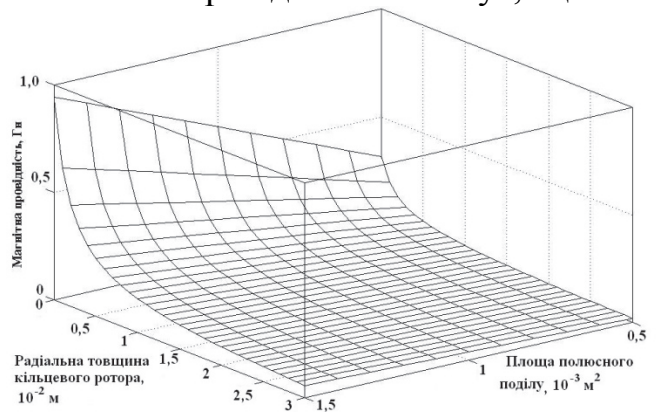


Рис. 10. Магнітна провідність феромагнітних елементів кільцевого ротора

Розрахунковий діаметр кільцевого ротора залежить від діаметра ВТ за пропорційним співвідношенням числових значень швидкохідностей за формулою:

$$D_k = D_d (\lambda_k / \lambda_d), \quad (15)$$

де D_d , λ_d – відповідно діаметр кола обертання та швидкохідність кінців лопатей ВТ, λ_k – швидкохідність кільцевого ротора радіусом r . Діаметр $D_d = 2R$ визначається проектною потужністю за розрахунковою швидкістю вітру.

Далі для відомого значення D_k на підставі компромісних електромагнітних і аеромеханічних обмежень визначається розмір τ полюсного поділу ротора, від якого залежать геометричні параметри статора для розрахунку магнітної системи.

Таким чином за результатами теоретичного аналізу запропонована загальна методика послідовності підпорядкованих розрахункових програм у розробленому алгоритмі проектування удосконалених безтрансмісійних ВЕК:

- для заданої потужності визначаються базові геометричні розміри аеромеханічної системи за розрахункових значень робочої швидкості вітру;

- визначення оптимального діаметра кільцевого ротора за відомими значеннями робочої швидкості вітру, швидкохідності та розмірами лопатей ВТ;

- визначення оптимальних геометричних розмірів перетину кільцевого ротора відповідно до компромісних вимог аеромеханічної та електромагнітної систем;

- визначення взаємно підпорядкованих розмірів полюсного поділу ротора і відповідних відстаней між секціями статора;

- оптимізація форми і розмірів магнітопроводу та обмоток секції статора за відомої площі перетину магнітопроводу і відстаней між секціями;

- розрахунок кількості секцій дугового статора відповідно до потужності.

У четвертому розділі «Теоретичний аналіз електромагнітних кіл безтрансмісійної вітроелектромеханічної системи» на основі теоретичних положень колових моделей електричних машин проаналізовані електромагнітні процеси в електромеханічній системі вітроелектрогенератора з кільцевим ротором та магнітоелектричним і електромагнітним модулями дугового статора.

Метою досліджень було теоретичне обґрунтування методів підвищення енергоефективності ВЕК за рахунок оптимізації електромагнітної системи. Основна технічна ідея побудови енергоефективної електромеханічної системи ВЕК полягала у створенні каскадного електромеханічного комплексу із бездавачевою взаємодією магнітоелектричних модулів в режимі індукторних

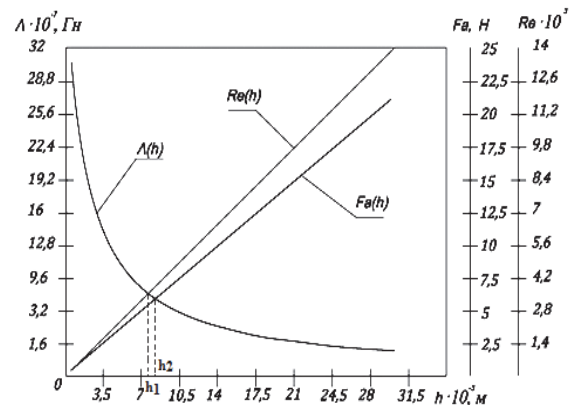


Рис. 11. Обмеження оптимальних значень товщини кільцевого ротора

генераторів та електромагнітних модулів у якості вентильних реактивних електричних машин зі спільним для них кільцевим ротором.

У біпакетній системі магнітоелектричного модуля раціональне використання постійного магніту базується на принципі незмінності його загального потоку, що можна пояснити на схемі розгортки (рис. 12). Така конструктивна схема забезпечує симетрію магнітних контурів, зрівноваження магнітних моментів та принцип почергової дії у кожному з пакетів всієї магнітної енергії. На рис. 12 показано: а) – схему розгортки біпакетної магнітоелектричної системи дугостаторного індукторного генератора з кільцевим ротором; б) – суміщений зі схемою координатний графік магнітної провідності; в) – суміщені графіки магнітних потоків у магнітопроводах; г) – графіки ЕРС у якірних обмотках пакетів.

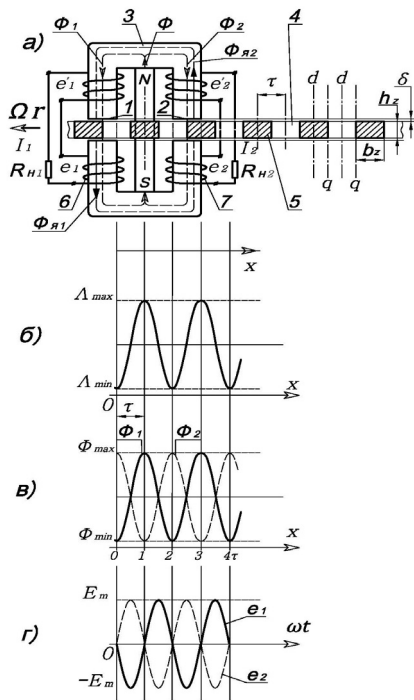


Рис. 12. Розгортка модуля і його суміщені графіки.

На схемі позначені: 1 і 2 – пакети магнітопроводів біпакетного модуля; 3 – суцільна міжпакетна ділянка магнітопроводу; 4 – немагнітна ділянка ротора; 5 – феромагнітна ділянка ротора; 6, 7 – якірні обмотки відповідних пакетів статора; b_z, h – відповідно ширина і висота феромагнітного елемента ротора; d – поздовжня і q – поперечна магнітні осі ротора; δ – робочий повітряний проміжок; τ – полюсний поділ ротора. Постійний магніт встановлений полюсами N і S відповідно між двома половинами біпакетних магнітопроводів статорного модуля.

У вибраній системі відліку відносного руху доцільно розглядати ротор нерухомим, а змінювати координати статора зі швидкістю Ωr у протилежному напрямі x . Тоді магнітна провідність Λ між кожною парою полюсних виступів з відповідною формою біпакетної секції статора у напрямі x змінюватиметься за гармонійним законом,

$$\Lambda(x) = \Lambda_{\min} + \Lambda_{\max} \cdot \sin^2\left(\frac{\pi x}{2\tau}\right), \quad (16)$$

що описується залежністю:

Даний математичний вираз адекватно відображає фізичну сутність процесу періодичної зміни величини магнітної провідності під час руху феромагнітних елементів ротора через міжполюсні проміжки пакетів статора. Почергова зміна магнітної провідності у кожному з пакетів зумовлює також гармонійну зміну магнітних потоків збудження, взаємно зміщених на полюсний поділ τ , що графічно показано на рис. 12(в). Значення магнітного потоку збудження від постійного магніту, наприклад, через пакет 1 описується виразом:

$$\Phi_1(x) = \Phi_{\min} + \Phi_{\max} \cdot \sin^2\left(\frac{\pi x}{2\tau}\right). \quad (17)$$

Оскільки пакет 1 зміщений відносно іншого пакету 2 на непарне число полюсних поділів (тут 3τ), то магнітний потік по ньому описуватиметься виразом:

$$\Phi_2(x) = \Phi_{\min} + \Phi_{\max} \cdot \sin^2 \left(\frac{\pi(x + \tau)}{2\tau} \right). \quad (18)$$

Відповідно до закону Кірхгофа загальний магнітний потік від постійного магніту в магнітному колі без насичення дорівнюватиме сумі потоків через обидва пакети за будь-якого положення феромагнітних елементів ротора відносно магнітопроводів статора, тобто сумою виразів (18) і (19).

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2 = \Phi_{\min} + \Phi_{\max} \cdot \sin^2 \left(\frac{\pi x}{2\tau} \right) + \Phi_{\min} + \Phi_{\max} \cdot \sin^2 \left(\frac{\pi(x + \tau)}{2\tau} \right). \quad (19)$$

Переходячи від координатної залежності до часової даній вираз матиме вигляд:

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2 = 2\Phi_{\min} + \Phi_{\max} \cdot (\sin^2 \omega t + \sin^2(\omega t + \pi/2)) = 2\Phi_{\min} + \Phi_{\max}, \quad (20)$$

$$\text{оскільки } \sin^2 \omega t + \sin^2(\omega t + \pi/2) = \sin^2 \omega t + \cos^2 \omega t = 1,$$

де $\omega = 2\pi f$ – кутова швидкість зміни магнітного потоку в кожному пакеті магнітопроводу; f – частота змінного магнітного потоку, Гц; $f = \Omega r / 2\tau$, де Ω – кутова швидкість обертового руху кільцевого ротора, рад/с.

Тобто загальний магнітний потік від постійного магніту через обидва магнітопроводи пакетів весь час залишається однаковим за величиною. Отже, дана біпакетна система, порівняно з монопакетною, теоретично має більш повне (майже удвічі) використання магнітного потоку збудження без загальної пульсації за повністю зрівноваженого магнітного моменту.

У якірних обмотках кожного з пакетів наводяться змінні ЕРС e_1 та e_2 однакової частоти із відповідними фазами, які визначаються за наступними формулами:

$$e_1 = -\frac{wk_0 d\Phi_1(t)}{dt} = -\frac{wk_0 d(\Phi_{\max} \sin^2 \omega t)}{dt} = -E_{\max} \cdot 2 \sin \omega t \cdot \cos \omega t = -E_{\max} \cdot \sin 2\omega t; \quad (21)$$

$$e_2 = -\frac{wk_0 d\Phi_2(t)}{dt} = -\frac{wk_0 d(\Phi_{\max} \sin^2(\omega t + \frac{\pi}{2}))}{dt} = E_{\max} \cdot 2 \sin \omega t \cdot \cos \omega t = E_{\max} \cdot \sin 2\omega t, \quad (22)$$

де w – кількість витків обмотки, k_0 – обмотковий коефіцієнт.

На координатно-суміщених графіках можна перевірити фізичну коректність цих виразів. Так на ділянці 0-1 (рис. 12 в) магнітний потік Φ_1 у першому пакеті за рахунок входження у його робочий повітряний проміжок феромагнітного елемента ротора буде зростати, що зумовлюватиме індукування ЕРС e_1 згідно з правилом Ленца негативного знаку. На ділянці 1-2 під час виходу цього феромагнітного елемента із пакету магнітний потік зменшуватиметься, а ЕРС буде позитивного значення. Аналогічно можна проаналізувати особливості зміни ЕРС e_2 у обмотці іншого пакету.

На схемі розгортки можна також наочно проаналізувати механізм дії магнітних потоків реакції якоря $\Phi_{я1}$ та $\Phi_{я2}$ у біпакетній системі. Так, наприклад, рух феромагнітного елемента ротора в напрямі збільшення розбіжності з положенням стійкої рівноваги зумовлює зменшення магнітної провідності, а внаслідок цього у явірній обмотці індукується ЕРС e_1 і струм I_1 такого напрямку, який створює магнітний потік реакції якоря $\Phi_{я1}$, що протидіє зменшенню потокозчеплення, тобто за напрямом співпадає з магнітним потоком збудження, сумарно ($\Phi_{я1} + \Phi_1$). Одночасно у іншому пакеті, де рух феромагнітного елемента ротора в напрямі зростання магнітної провідності магнітний потік реакції якоря $\Phi_{я2}$ протидіє зростанню потокозчеплення і направлений зустрічно потоку збудження, різницею ($\Phi_2 - \Phi_{я2}$). Таким чином магнітні потоки реакції якоря у біпакетній системі утворюють паралельний відносно постійного магніту контур магнітопроводу і направлені послідовно, обумовлюючи процес створення електромагнітного моменту та електромеханічного перетворення енергії в режимі генератора.

Колова модель біпакетної магнітоелектричної системи має двоконтурну зведену заступну схему (рис.13), розрахунок якої виконується із використанням робочої діаграми постійного магніту та визначеними величинами усіх складових магнітних провідностей. Аналіз зведеної заступної схеми дозволяє зробити висновок про умову мінімізації непродуктивної постійної складової магнітного потоку в магнітопроводі, де зустрічно направлений йому магнітний потік реакції якоря має бути рівним за величиною. Жорстка механічна залежність фаз ЕРС e_1 і e_2 від координатного положення ротора дозволяє вважати їх надійними інформативними параметрами його кутової ідентифікації для роботи електромагнітних модулів вентильними реактивними генераторами. При цьому очевидні принципові переваги над традиційними системами ідентифікації ротора, наприклад, фотоелементами, або датчиками Хола.

Принцип функціонування електромагнітного модуля можна проаналізувати за будовою його електромагнітної системи, показаної на рис. 9. Електромагнітна система складається із явірної обмотки, намотаної на магнітопроводі, у якому виконаний робочий проріз, де безконтактно рухається кільцевий ротор із почерговими немагнітними і феромагнітними ділянками. Робота за принципом вентильної реактивної електричної машини полягає у координованій комутації імпульсів струму збудження в обмотці та силовою взаємодією із рухомою ділянкою магнітного кола, якою є феромагнітний елемент ротора. Рух феромагнітних елементів ротора зумовлює координатні зміни магнітної провідності, а відтак індуктивності системи за гармонійним законом. Оскільки на феромагнітний елемент ротора можуть діяти лише сили притягування незалежно від напрямку магнітного потоку, тому перетворення механічної енергії в електричну принципово можливе лише у момент виходу із

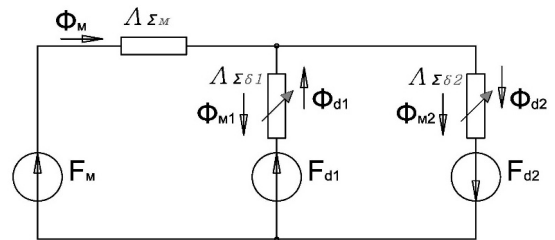


Рис. 13. Зведена заступна схема магнітної системи

положення стійкої рівноваги, коли індуктивність зменшується ($dL/d\theta < 0$). Це описується рівнянням електричного кола:

$$U = Ri + d\psi / dt = Ri + \Omega d\psi / d\theta, \quad (25)$$

де ψ – потокозчеплення, яке можна виразити $\psi = Li$, тоді вираз буде

$$U = Ri + \Omega d(Li) / d\theta = Ri + Ldi / dt + \Omega idL / d\theta \quad (24)$$

де Ldi/dt – ЕРС самоіндукції (трансформаторна складова); $\Omega idL/d\theta$ – ЕРС електромеханічного перетворення, зумовлена зміною кутового положення кільцевого ротора, генераторний режим за ($dL/d\theta < 0$).

Помноживши складові на струм отримаємо вираз балансу потужностей системи електромагнітного модуля в режимі реактивного генератора:

$$U \cdot i = Ri^2 + Lidi / dt + \Omega i^2 dL / d\theta. \quad (25)$$

Аналіз рівняння показує, що ефективність даної електромеханічної системи залежить від швидкості та кратності зміни індуктивності в процесі механічного руху, а також за умови мінімального активного опору обмотки.

За результатами теоретичних досліджень цього розділу можна зробити узагальнений висновок про технічну реалізацію каскадного електромеханічного комплексу із функціональною взаємодією статорних модулів магнітоелектричного типу для генерування синусоїдної ЕРС, фаза якої забезпечує бездавачеву ідентифікацію координатного положення ротора для роботи електромагнітних модулів у режимі вентильних реактивних електричних машин.

У п'ятому розділі *«Польовий аналіз і результати імітаційного моделювання електромагнітних систем дугостаторних вітроелектричних генераторів з кільцевим ротором»* викладена методика побудови та дослідження коло-польових імітаційних моделей за допомогою комп'ютерних програмних комплексів і розраховані магнітні системи для заданих розмірів магнітопроводів, обмоток та магнітів.

Дослідження польових моделей проводили за допомогою програмних комплексів ELCUT і COMSOL для визначення раціональних варіантів побудови електромеханічних систем та встановлення геометричних умов мінімізації магнітного моменту, зумовленого втягуванням феромагнітних елементів кільцевого ротора постійними магнітами статора у положення стійкої рівноваги (рис. 14). Встановлено, що максимального значення магнітний момент різних знаків набуває відповідно за втягування феромагнітних елементів ротора у міжполюсний простір і виведенні їх звідти на однаковій відстані від положення стійкої рівноваги. Слід зазначити, що для заданих параметрів моделі магнітоелектричного модуля максимальне абсолютне значення магнітного моменту для однієї міжполюсної пари становило близько $M_f = 1,22$ Нм.

Аналіз графіка магнітного моменту дозволив зробити висновок, що він є дзеркально симетричним відносно силової осі симетрії. Тобто максимального значення магнітний момент обох знаків набуває на відстані $2/3$ від положення стійкої рівноваги. Це дало підстави встановити формальну залежність умови нульового балансу магнітних моментів для різної кількості магнітопровідних пакетів статора.

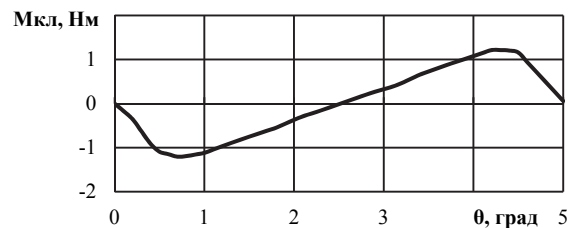


Рис. 14. Магнітний момент полюсного елемента ротора

На підставі графічного моделювання формалізоване геометричне співвідношення між полюсним поділом ротора τ і відстанню між секціями статора t_c , що забезпечують рівновагу магнітних сил втягування і витягування відносно положень стійкої та нестійкої рівноваги:

$$t_c = \tau(1 + 2/m), \quad (26)$$

де t_c – відстань між секціями дугового статора; m – парна кількість однопакетних секцій статора.

За такою залежністю, наприклад, трифазову систему можна виконати лише парним числом пакетів статора, яке буде кратне трьом: 6, 12, 18, 24, 30, 36.

Одночасно дана формула є оптимізаційною, оскільки визначає мінімально допустиму відстань, яка згідно з виразом (26) ніколи не може бути меншою одного полюсного поділу і більшою двох полюсних поділів. Дотримання даної залежності забезпечує зменшення пульсації магнітного моменту за збільшення парного числа пакетів дугового статора.

Дослідження тривимірної моделі розподілу магнітного поля в активній зоні проводили чисельним методом скінчених елементів. Для розрахунку магнітного поля та магнітної провідності системи методом скінчених елементів, залежно від положення ротора, використаний фрагмент цієї системи, з отриманим розподілом індукції (рис. 15.). Він

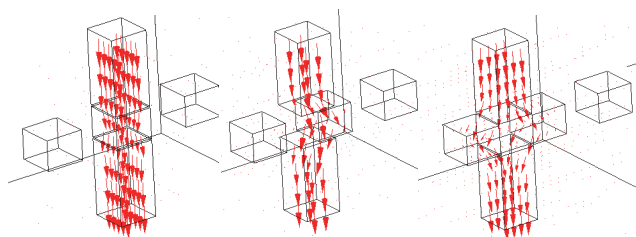


Рис. 15. Розподіл індукції

містить електромагнітні полюси статора та фрагмент кільцевого ротора із трьома суміжними елементами. Напруженість магнітного поля \mathbf{H} у активній зоні магнітної системи має лише одну функціональну складову, яку можна виразити скалярним магнітним потенціалом φ_m , тоді $\mathbf{H} = -\nabla \varphi_m$. Розподілення скалярного магнітного потенціалу за виразом $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$ описується рівнянням Лапласа:

$$\nabla \cdot (-\mu_0 \mu_r \nabla \varphi_m) = 0, \quad (27)$$

де $\varphi_m = \varphi_{m,1} = 0$, на верхній поверхні другого полюсу $\varphi_m = \varphi_{m,2}$, а на всіх інших поверхнях прийняті умови магнітної ізоляції $\partial \varphi / \partial n = 0$. Поставлена польова

задача розраховувалася за допомогою пакету програм COMSOL. Після визначення розподілення скалярного магнітного потенціалу, значення магнітної провідності даної магнітної системи розраховували за виразами:

$$\Lambda(x) = \Phi / (\varphi_{m,1} - \varphi_{m,2}), \quad \Phi = \int_{S_1} B_n dS, \quad (28)$$

де S_1 - поверхня верхнього полюса, що межує з повітряним проміжком, а координата x прийнята у напрямі лінійної швидкості руху магнітопровідних елементів ротора.

Графічні результати розрахунків моделі для однакових за площею перетину пакетів кільцевого ротора показують (рис. 16), що збільшення геометричного розміру h зумовлює зменшення усіх координатних значень магнітної провідності, однак різною мірою для їх максимумів і мінімумів. Зменшення максимальних значень магнітної провідності можна пояснити збільшенням загальної довжини магнітопровідної ділянки ротора магнітного кола.

Одночасно зменшення мінімальних значень провідності пояснюється збільшенням відстані між торцевими поверхнями магнітопроводу. Проте останню залежність важко описати аналітично, оскільки одночасно із збільшенням відстані збільшуються і вертикальні бічні поверхні сусідніх магнітопровідних пакетів кільцевого ротора, що компенсує зменшення мінімальної магнітної провідності. Було прогнозовано, що існує таке значення висоти магнітопровідного пакету ротора, після якого збільшення цього розміру не призведе до подальшого зростання різниці магнітних провідностей. У моделі була задана прямокутна геометрична форма перетину магнітопроводу статора, однакова з феромагнітними елементами ротора, яка єдина серед усіх можливих форм за їх аксіального розміру ℓ забезпечує максимальну площу суміщення нормальних проекцій поверхонь та лінійні зміни цієї площі в процесі руху ротора.

Розраховували також значення магнітної провідності для різних за розміром перетинів магнітопроводів квадратної форми відповідно зі сторонами квадратів 15, 25 і 35 мм. Кратність зміни магнітної провідності залежно від висоти пакету ротора за вказаних перетинів показана на рис. 17.

Зростання кратності пропорційно до збільшення площі перетину магнітопроводів узгоджується з графічною залежністю. Одночасно

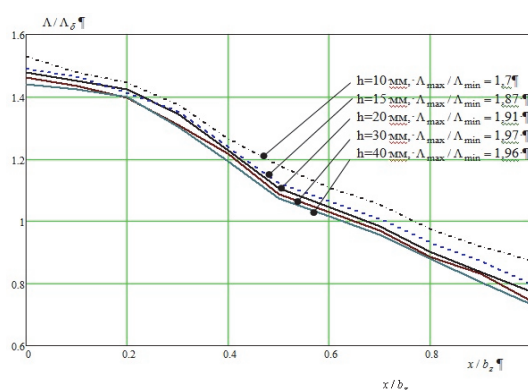


Рис. 16. Магнітні провідності за радіальної товщини ротора

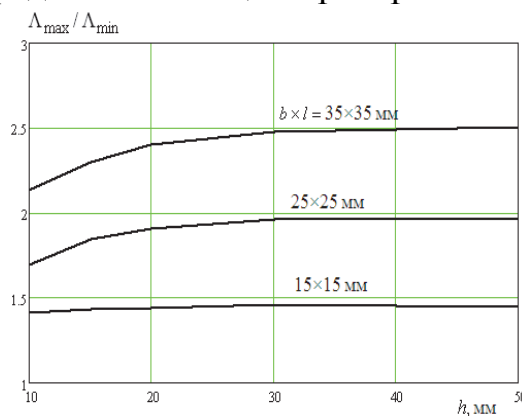


Рис. 17. Кратності провідностей

прослідковується певна закономірність досягнення найбільшого значення кратності змін магнітної провідності для різних за перетином магнітопроводів. Так для магнітопроводу квадратного перетину зі стороною 15 мм збільшення різниці провідностей відбувається лише до розміру h близько 25 мм, відповідно для перетину зі стороною 25 мм максимальна кратність провідностей була за висоти h близько 30 мм, а для квадратного перетину зі стороною 35 мм відповідно близько 37 мм. Була отримана лінія тренду оптимальних співвідношень висоти і ширини полюсного поділу магнітопроводу квадратного перетину кільцевого ротора виразом:

$$h_{opt} = 10,33 \cdot \ln(\tau) - 4,0504 \quad (29)$$

із достовірністю апроксимації 0,9987 в межах абсолютних розмірів від 10 до 200 мм. Графік оптимальних розмірів кільцевого ротора показано на рис. 18.

Польовий аналіз процесів у розробленій біпакетній магнітоелектричній системі проведений на основі геометричної моделі та зведеної заступної схеми її магнітного кола.

Для розрахунку

тривимірної польової моделі вирішували польову задачу для скалярного магнітного потенціалу φ_m згідно з виразом напруженості магнітного поля $\mathbf{H} = -\nabla \varphi_m$. Розподіл скалярного потенціалу поля постійного магніту за умови ($\nabla \cdot \mathbf{V} = 0$) описується наступним рівнянням:

$$\nabla \cdot (-\mu_0 \mu_r \nabla \varphi_m + \mathbf{V}_r) = 0. \quad (30)$$

Прийняті граничні умови магнітної ізоляції на всіх зовнішніх поверхнях ($-\partial \varphi / \partial n = 0$). У цьому рівнянні μ_r відносне значення магнітної проникності ділянок магнітного кола, \mathbf{V}_r – значення залишкової магнітної індукції постійного магніту, який у моделі був на основі Nd-Fe-B із її абсолютним значенням 1,26 Тл. Поставлена польова задача розрахована в пакеті програм COMSOL.

В результаті моделювання отримана просторова картина числових значень магнітної індукції на всіх ділянках просторової моделі магнітної системи при фіксованому положенні за повного суміщення феромагнітного елемента ротора у першому пакеті та немагнітної ділянки у другому, що показано на рис. 19 (а). За картиною значень магнітної індукції можна зробити висновок, що у біпакетному магнітопроводі відбувається почергове шунтування магнітних провідностей кожної з паралельних ділянок та перерозподіл загального магнітного потоку. Проаналізована також картина розподілу магнітної індукції у положенні феромагнітних елементів кільцевого ротора до половини суміщених у обох пакетах, як показано на рис. 19 (б).

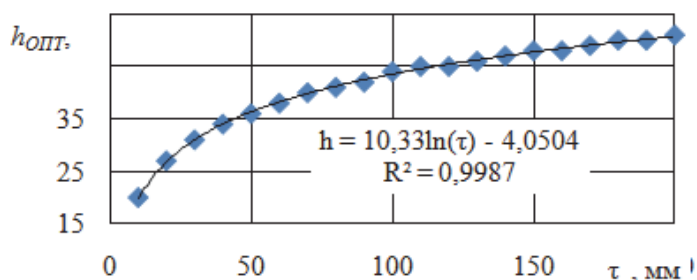


Рис. 18. Лінія оптимальних розмірів кільцевого ротора

У такому положенні загальний потік постійного магніту розподіляється рівномірно, проходячи одночасно через обидва пакети і два феромагнітні елементи ротора. За просторовою картиною значень магнітної індукції видно, що сумарна магнітна провідність двох

наполовину суміщених паралельних ланок буде більшою, ніж провідність однієї повністю суміщеної, оскільки магнітний потік у першому випадку проходить всередині двох феромагнітних елементів ротора по всьому їх об'єму. В процесі моделювання також отримана залежність величини магнітних потоків на кожній ділянці магнітного кола системи від координатного положення феромагнітних елементів ротора квадратного перетину зі стороною 25 мм, що показано на рис. 20.

Кратність зміни магнітного потоку в кожному із двох розгалужених магнітопроводів становить близько 4,5. Вірогідно, що це спричинено такою ж кратністю зміни магнітної провідності кожної із двох ділянок магнітопроводів при зміні в їхніх робочих проміжках суміщених положень феромагнітних елементів ротора.

Графічна залежність сумарного потоку від постійного магніту через спільну колекторну ділянку магнітопроводу (верхня крива рис. 20) показує, що його максимум співпадає з положенням феромагнітних елементів кільцевого ротора до половини суміщених у обох пакетах і перевищує мінімальне значення магнітного потоку за повного суміщення магнітопроводів одного пакету приблизно на 11 %, що фактично підтверджує попередні висновки про ефективне використання маси магніту.

Для розрахунку робочих характеристик наведеного вище біпакетного модуля генератора була розроблена комп'ютерна модель однієї його секції за допомогою пакету програм Matlab/Simulink, яка показана на рис. 21. Схематична модель складається із пов'язаних між собою електричного кола (а) та магнітного кола (б). Електричне коло містить дві обмотки, що розташовані на магнітопроводах пакету. Ці обмотки з'єднані та підключені до активного навантаження з опором R_n .

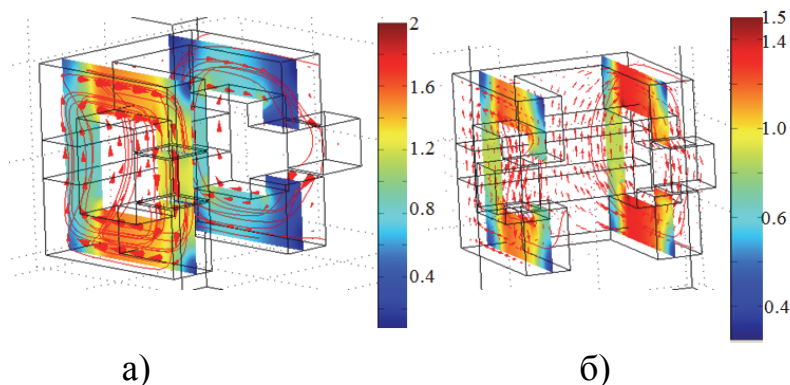


Рис. 19. Розподіл індукції у біпакетній системі

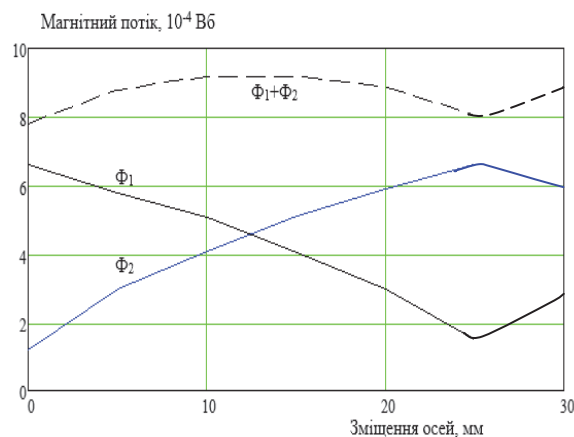


Рис. 20. Координатні залежності магнітних потоків

Магнітне коло містить джерело постійного струму, що моделює постійний магніт та має два магнітних опори (R_{ma} та R_{ma1}), що змінюються залежно від координатного положення магнітопровідних елементів ротора, яке у свою чергу залежить від лінійної швидкості руху цих елементів $v = dx/dt$, а також два чотириполюсники PW та $PW1$, що відповідають двом обмоткам на двох частинах магнітопроводів та відображають взаємодію магнітного та електричного кіл. На рис.21 (а) наведені засоби візуалізації результатів розрахунків напруги, струму та потужності (середньої та миттєвої) на навантаженні.

У розрахунках задавали значення швидкості руху феромагнітних елементів, яке змінювалося у діапазоні від 1 до 10 м/с, що відповідало коловим швидкостям руху експериментального зразка кільцевого ротора. Наведені результати розрахунків моделі для однієї секції генератора.

Результати розрахунку змінних у часі напруги, струму та потужності при значенні опору навантаження $R_H = 3 \text{ Ом}$ і швидкості руху феромагнітних елементів $V=2,5 \text{ м/с}$, що відповідає частоті струму 50 Гц, наведені на рис. 22.

Вказані вище абсолютні значення колової швидкості феромагнітних елементів задані відповідно до геометричних розмірів експериментальної моделі трилопатевої вітроелектричної установки з довжиною лопатей 3,5 м, діаметром кільцевого ротора 2 м і 120 феромагнітних елементів на ньому. Була визначена швидкохідність вітрової турбіни, яка в даному режимі становила близько 8,5; тому вказана колова швидкість руху 2,5 м/с феромагнітних елементів кільцевого ротора радіусом 1м отримана за швидкості вітру близько 1 м/с. Із графіків видно, що після виходу на сталий режим, форми напруги і струму практично не відрізняються від синусоїдної. Більш детально спектральний склад кривих напруги та струму показано на рис. 23, де також наведено отриману зовнішню характеристику та потужність генератора. Як видно із зовнішньої характеристики, напруга холостого ходу однієї якірної обмотки дорівнює 4,4 В, а величина струму короткого замикання – 1,7 А. Максимальна потужність, що виділяється з якірної обмотки одного

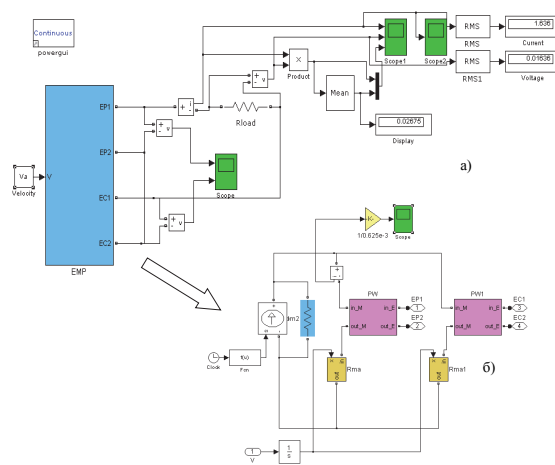


Рис. 21. Simulink-модель генератора

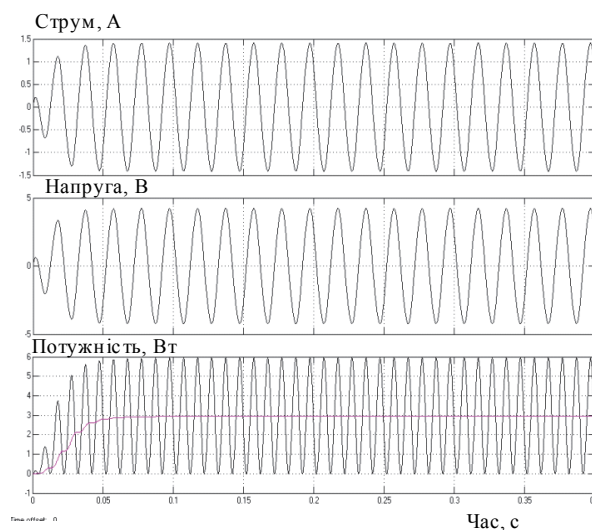


Рис. 22. Розрахункові характеристики імітаційної моделі

паketу в активному навантаженні, досягається за величини струму 1,1 А за опору $R_H = 3 \text{ Ом}$ і становить 3 Вт.

Тоді від обох обмоток біпакетного модуля можна мати на активному навантаженні потужність 6 Вт, що є близьким значенням до теоретично можливої потужності, отриманої з вітрового потоку швидкістю 1 м/с турбіною діаметром 7 м. Тобто результати моделювання підтверджують можливість безтрансмійного електромеханічного перетворення енергії вітру за допомогою лише одностаторного модуля починаючи з мінімальних пускових швидкостей. На рис. 23 також показано спектральний склад кривих напруги та струму для трьох режимів роботи генератора, звідки видно, що при холостому ході крива напруги містить широкий спектр вищих гармонік, а в режимі максимальної потужності та за короткого замикання найбільшою є внесок третьої гармоніки. Значення коефіцієнта спотворення синусоїди для напруги холостого ходу THD_U становить 0,19%, для номінального струму THD_I становить 0,23%, а найбільше для струму в режимі короткого замикання 2,5%.

На рис. 24 наведена розрахункова залежність потужності від опору навантаження за різних лінійних швидкостей руху феромагнітних елементів. Із графіка видно, що є оптимальне значення опору, яке збільшується при зростанні колової швидкості. Це можна пояснити зростанням частоти струму при збільшенні кутової швидкості та пропорційним зростанням внутрішнього імпедансу генератора. Встановлено, що оптимальне значення опору навантаження приблизно дорівнює значенню цього імпедансу. Вірогідно, що за підключення резонансної ємності в коло навантаження для компенсації індуктивного опору генератора можна суттєво збільшити величину максимальної потужності. На рис. 24 показані розраховані залежності потужності генератора з кільцевим ротором діаметром 2 м за колових швидкостей 1; 2,5; 5; 10 м/с, які будуть за середніх швидкостей вітру відповідно близько 0,5; 1; 2; 4 м/с, що підтверджує принципові можливості електромеханічного перетворення низькопотенційних вітрових потоків безтрансмійною вітроелектричною установкою, починаючи одразу після

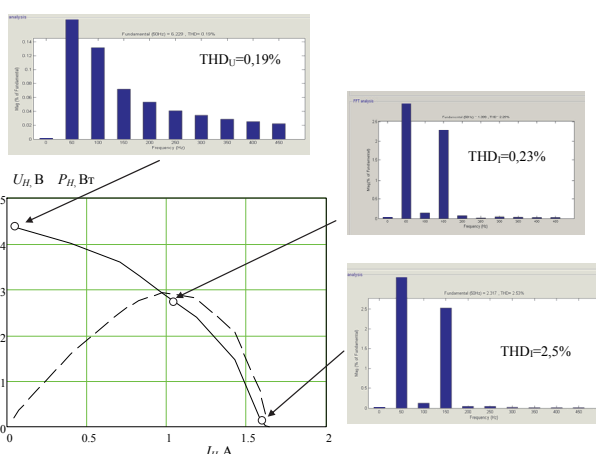


Рис. 23. Зовнішня характеристика і спектральний склад струмів

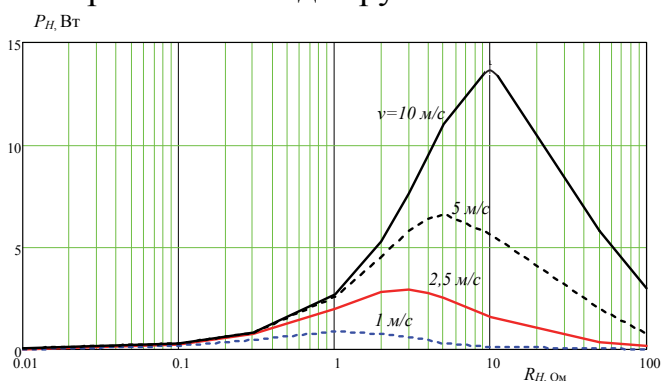


Рис. 24. Оптимальні опори навантаження за різних колових швидкостей ротора

моменту пуску та забезпечує широкий діапазон збільшення потужності комплектуванням відповідного числа статорних модулів.

У шостому розділі «Методики, технічна база і результати експериментальних досліджень» обґрунтовано план експериментальних досліджень, описані методики і технічні засоби експериментальної бази та наведені результати досліджень і їх аналіз.

Проводили експериментальне визначення індуктивності електромагнітної системи для розрахунку магнітної провідності та порівняння її з результатами моделювання.

Для отримання достовірних результатів визначення провідності дотримувалися адекватності умов за величиною індукції у магнітопроводі з однакової електротехнічної сталі.

Експериментальне визначення магнітної провідності методом вимірювання змінного струму обмотки за сталої частоти і напруги живлення обмотки з відомим числом витків дозволило побудувати експериментальну залежність 2 (рис. 25) магнітної провідності від координатних положень пакету ротора на спільному графіку із розрахунковою залежністю 1, отриманою при моделюванні магнітної системи. Розбіжність значень не перевищує 3 %, хоч результати впливу розмірів сітки розбивки моделі помітні ділянками ламаної лінії кривої 1 (рис. 25), з чого можна зробити висновок про високу точність розрахунку польової моделі методом скінчених елементів у програмі COMSOL.

Для експериментів була виготовлена стендова установка (рис. 26), де 1 – регульований електропривід; 2 – феромагнітні елементи ротора (пакети з пластин електротехнічної сталі); 3 – немагнітопровідний (діелектричний) корпус кільцевого ротора; 4 - модуль статора.

Феромагнітні елементи 2 ротора виконані з пластин електротехнічної сталі марки Ст 2211, зібраних у пакети круглої форми діаметром 30 мм висотою 25 мм, монолітно закріплених у діелектричному корпусі 3, після чого обточених на осі обертання у зібраному стані. З такої ж електротехнічної сталі виконані пакети пластин магнітопроводу модуля 4 статора, де встановлений магніт марки N42 (Nd-Fe-B) та намотані обмотки загальним числом витків 200. Методика експериментальних досліджень форми і фази ЕРС у якірних обмотках кожного з пакетів полягала у отриманні осцилограм за умови сталих обертів та відсутності навантаження. Експериментальні дослідження форми ЕРС виконували за допомогою комп'ютерної приставки осцилографа шляхом

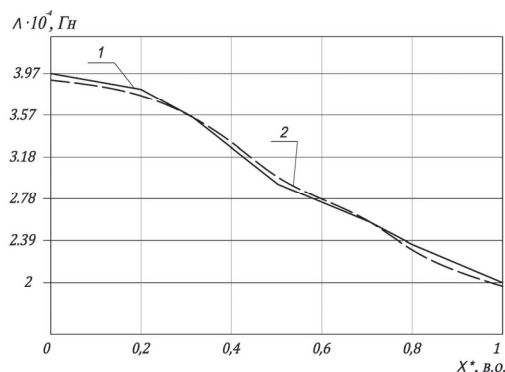


Рис. 25. Розрахункові (1) та експериментальні (2) значення магнітної провідності

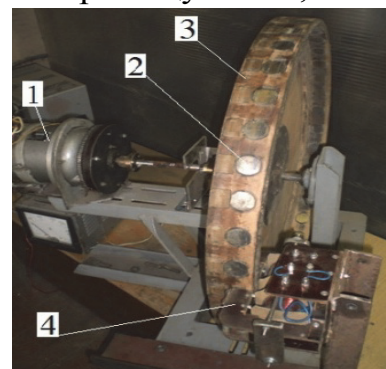
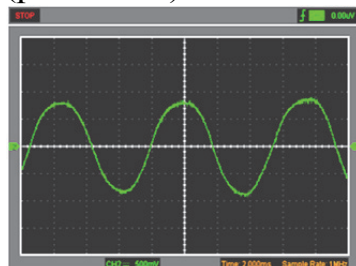


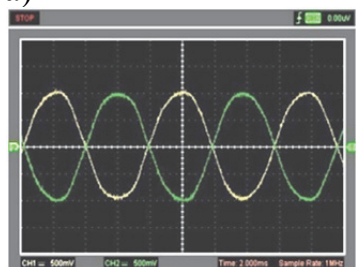
Рис. 26. Експериментальний стенд

одночасного підключення через два окремі вхідні канали обмоток різних пакетів.

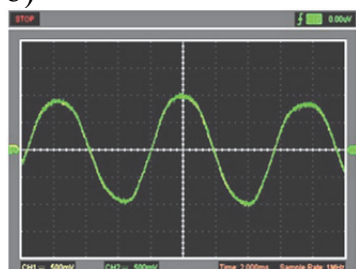
Осцилограма напруги якірних обмоток одного пакету (рис. 27 а) підтверджує теоретичні розрахунки і синусоподібну форму ЕРС з коефіцієнтом форми близько 1,11 (на імітаційній моделі розрахований коефіцієнт спотворення 0,19%). Суміщення осцилограм напруги одночасним включенням якірних обмоток двох різних пакетів через два вхідних канали осцилографа має картину (рис. 27 б) включення синусоподібних ЕРС у протифазі, що відповідає їх теоретичним формулам (22), (23) та графіку моделі.



а)



б)



в)

Рис. 27. Осцилограми напруги обмоток біпакетного модуля генератора

Взаємне інверсне сполучення якірних обмоток пакетів на осцилограмі (рис. 27 в) дає суміщення синусоїд з досить незначним впливом відхилень точності виготовлення обмоток статора і феромагнітних елементів кільцевого ротора, що дозволяє зробити висновок про технічну можливість застосування комутаційних методів регулювання. Причому на одній біпакетній секції можливі чотири варіанти комутаційних схем чотирьох якірних обмоток за незмінного потоку збудження, що дозволяє виконувати варіанти симетричних дво- і трифазових систем дугового статора.

Результати досліджень частотних характеристик холостого ходу наведені на рис. 28. Експериментальні частотні характеристики без навантаження повністю підтверджують теоретичні розрахунки за відсутності насичення магнітопроводу. На всьому частотному діапазоні напруга за різних схем сполучення обмоток відповідає сумарному значенню їх напруги з мінімальною похибкою, зумовленою точністю вимірювання та різницею ЕРС кожної обмотки. Характер частотних залежностей з навантаженням (рис. 29) підтверджує розрахункові результати згідно з якими найбільше падіння напруги буде за послідовної схеми сполучення усіх обмоток секції. Найменше

впливає незмінне навантаження на частотну характеристику за паралельної схеми сполучення усіх обмоток модуля. Зовнішні характеристики біпакетного модуля статора показані на рис. 30 за активного типу навантаження для чотирьох схем сполучення якірних обмоток. Експериментальні залежності з активним навантаженням близько відповідають зовнішнім характеристикам, розрахованим на імітаційній моделі за струмами короткого замикання якірної обмотки (U_2) одного пакета відповідно 1,75 А і 1,7 А. На рис. 31 графічно зображені залежності потужності за різних струмів навантаження і сполучень обмоток біпакетного модуля.

Загальним висновком за результатами експериментальних досліджень є висока збіжність із розрахунковими значеннями, отриманими методами коло-

польового моделювання, тому їх теоретичні положення і методики можна застосовувати в інженерних технологіях проектування безтрансмійних ВЕК.

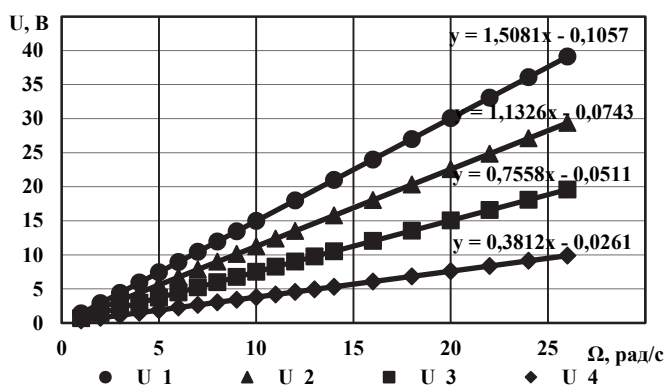


Рис. 28. Частотні характеристики напруги біпакетного модуля за відсутності навантаження

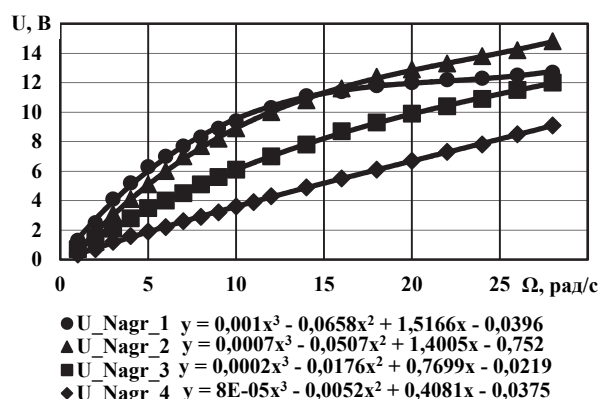


Рис. 29. Частотні характеристики напруги біпакетного модуля із постійним навантаженням

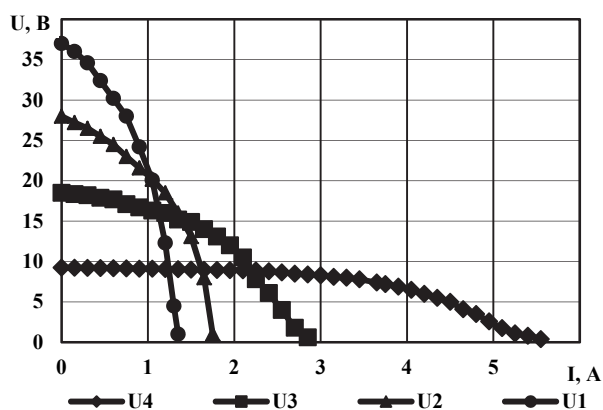


Рис. 30. Зовнішні характеристики біпакетного модуля за активно-індуктивного навантаження $\cos \varphi=0,8$

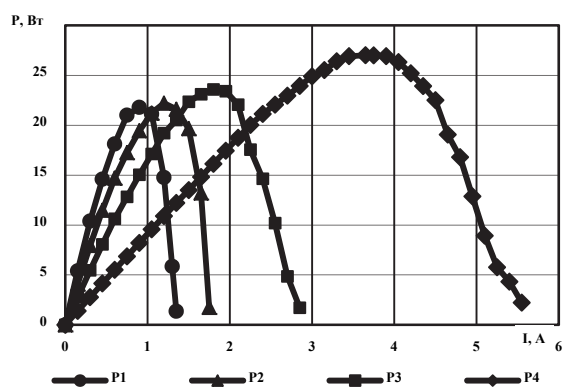


Рис. 31. Активна потужність за різних схем і струмів навантаження модуля.

У цьому розділі «Впровадження результатів досліджень у проектування безтрансмійних вітроелектричних комплексів; випробування та розрахунок техніко-економічної ефективності» розроблені інженерні методики проектування безтрансмійних вітроелектричних комплексів на базі електромеханічних систем із кільцевим ротором, інтегрованим у конструкцію ВТ та внутрішньою бездавачевою електромехатронною системою з функціональною взаємодією різнотипових модулів дугового статора. Описана методика оцінки техніко-економічної ефективності використання розроблених безтрансмійних ВЕК.

Загальна послідовність етапів проектування визначена відповідно до встановлених пріоритетів за ступенем впливу на енергетичні процеси. Спеціальні методики були розроблені для проектування блоків кільцевого ротора, дугового статора, систем і апаратів керування та комунікації з енергоспоживачами.

Виконання блоку коаксіального кільцевого ротора на ВЕУ та загальну схему розташування феромагнітних полюсних елементів на ньому показано на рис. 32, де 1 – поворотна вертикальна щогла, 2 – основна лопать, 3 – кільцевий ротор із феромагнітними полюсними елементами, 4 – внутрішньокільцеві лопаті, 5 – корпус дугового статора і апаратури, 6 – хвостовий дифузор, 7 – електроанемометр, 8 – феромагнітний елемент, 9 – немагнітна ділянка.

У розробленій інженерній методиці проектування блоку кільцевого ротора використані формули розрахунку конструктивних розмірів, які впливають на функціональні параметри аеромеханічної та електромагнітної систем. Вплив конструктивних варіантів комплектування дугового статора уніфікованими статорними модулями магнітоелектричного індукторного типу можна оцінити осцилограмою робочих напруг за паралельного сполучення обмоток, рис. 33.

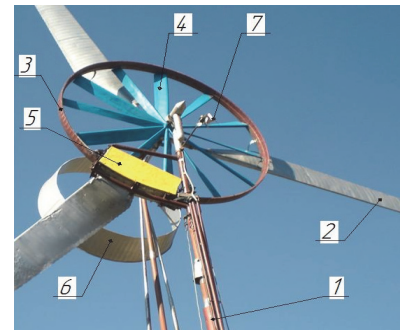
На осцилограмі видно незначну амплітудну різницю напруги біпакетних статорних модулів.

Для проведення функціональних і виробничих випробувань було вибрано як енергоутилізаційне навантаження водонагрівальну систему комбінованого вітросонячного комплексу, встановленого на перевізній платформі (рис. 34), як автономне навантаження підключали через автономний інвертор потужністю 2 кВт електроінструменти та електричні лампи розжарювання.

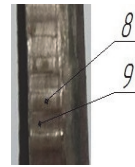
На рис. 34 позначені: 1 – колісна платформа, 2 – висувні опори платформи, 3 – перекидна піраміда з апаратурним відділенням, 4 – поворотна щогла; 5 – статор генератора, 6 – електроанемометр, 7 – кільцевий ротор, 8 – лопать, 9 – хвостовий дифузор, 10 – водяний термос ємністю 0,35 м³ з електронагрівальним блоком, 11 – геліоколектор.

Діаметр лопатевого ротора ВЕУ становить 7000 мм, висота до осі обертання від поверхні ґрунту 7500 мм, габаритна висота 11000 мм, діаметр кільцевого ротора 2000 мм. Система механічного гальмування з ручним приводом. Габарити колісної платформи: довжина 6500 мм, ширина 2620 мм, висота від дорожньої поверхні 1000 мм.

Для оцінки техніко-економічної ефективності безтрансмійних ВЕК крім загальноприйнятих розрахунків була розроблена методика, що базується на основі стохастичної моделі місцевого вітроенергетичного потенціалу за



а)



б)

а) загальний вигляд;

б) фрагмент поверхні кільцевого ротора

Рис. 32. Безтрансмійна ВЕУ

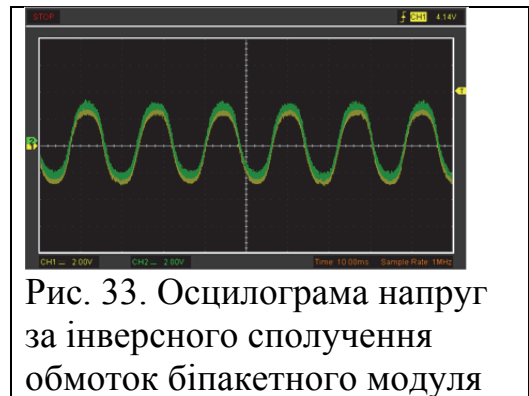


Рис. 33. Осцилограма напруг за інверсного сполучення обмоток біпакетного модуля

критерієм Вейбула. Розраховані ймовірні значення річного виробітку електроенергії та порівняні новий і базовий варіанти. Розрахунок річної тривалості роботи та обсягу виробленої електроенергії виконували з використанням градації Вейбула на місцевості з відомою середньою річною швидкістю вітру для побудови номограми (рис. 35), де 1 – стохастична повторюваність швидкості вітру, 2 – розрахункова річна тривалість роботи ВЕУ, 3 – розподіл питомого вітроенергетичного потенціалу; 4 – питомий річний виробіток електроенергії за різних стартових швидкостей вітру.

Методика побудови графіків була наступною: стохастична диференційна повторюваність швидкостей вітру даної місцевості за градаціями Вейбула описується залежністю:

$$f(V) = \frac{\gamma}{\beta} \left(\frac{V}{\beta}\right)^{\gamma-1} \cdot e^{-\left(\frac{V}{\beta}\right)^{\gamma}}, \quad (31)$$

де V – ймовірна швидкість вітру; γ – параметр середніх значень швидкості вітру; β – параметр форми кривої розподілу; значення параметрів γ і β визначаються за необхідний період спостережень; для попередньої оцінки достатньо надати γ , наприклад, значення 1,5. На графіку диференційна повторюваність має криву 1.

Розрахункова річна тривалість T роботи ВЕУ визначається інтегральним значенням часу безперервної роботи залежно від мінімальних пускових і робочих швидкостей вітру за виразом:

$$T(V) = -e^{-\left(\frac{V_{max}}{\beta}\right)^{\gamma}} + e^{-\left(\frac{V}{\beta}\right)^{\gamma}}, \quad (32)$$

де V_{max} – максимальна допустима швидкість вітру, (задано 20 м/с).

Розподіл питомого вітроенергетичного потенціалу за диференційною повторюваністю швидкостей вітру визначається залежністю:

$$W(V) = \frac{-e^{-\left(\frac{V_{max}}{\beta}\right)^{\gamma}} + e^{-\left(\frac{V}{\beta}\right)^{\gamma}}}{40} \cdot V^3. \quad (33)$$

Для заданих значень розподіл питомого вітроенергетичного потенціалу за ймовірними швидкостями вітру має графічну залежність 3 (рис. 34).

Питомий річний вітроенергетичний потенціал (кВт год/м²) розраховується наступним інтегральним виразом.

$$Wh(V) = \left(\frac{1}{256}\right) \int_0^{20} \left[-e^{-\left(\frac{V_{max}}{\beta}\right)^{\gamma}} + e^{-\left(\frac{V}{\beta}\right)^{\gamma}}\right] \cdot V^3 dV. \quad (34)$$

Графічна залежність питомого річного вітроенергетичного потенціалу (крива 4) є інтегральною сумою енергії, отриманої з вітрового потоку, що діє на обвіювану поверхню площею 1 м².

На графіку наведено приклад, з якого видно, що ВЕУ, яка починає працювати за швидкості вітру 2 м/с матиме питомий річний виробіток

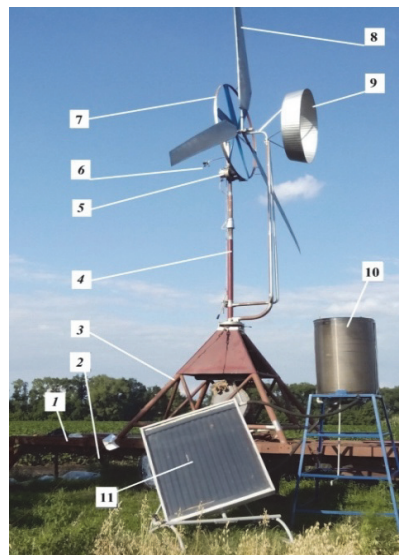


Рис. 34. Вітроелектричний комплекс на колісній платформі

52 кВт·год/м², а інша, починаючи зі швидкості 5 м/с матиме виробіток 42 кВт·год/м², що приблизно на 20 % менше. За допомогою номограми можна також визначити ймовірну річну тривалість роботи за координатами точок перетину вертикальних прямих з кривою 2, наприклад, за початкової робочої швидкості 2 м/с річна тривалість роботи буде близько 6800 годин, а за швидкості 5 м/с відповідно близько 3570 годин, що майже удвічі менше. За описаною методикою ймовірний річний обсяг виробленої електроенергії ВЕУ визначається діаметром та коефіцієнтом потужності ВТ і коефіцієнтом енергоефективності ВЕК за формулою:

$$Wh_{\text{веу}} = 0,25 Wh_n \pi D^2 \cdot C_p \cdot \eta_{\text{век}} \eta_{\text{п}}, \text{ кВт} \cdot \text{год}, \quad (35)$$

де Wh_n – питомий річний вітроенергетичний потенціал, кВт·год/м²; C_p – коефіцієнт потужності ВТ; $\eta_{\text{век}}$, $\eta_{\text{п}}$ – відповідно ККД ВЕК та ККД електропередачі в.о.

Зведена собівартість виробленої електроенергії залежить від прогнозованих цінових показників затрат і відсотка кредитування та розраховується за формулою:

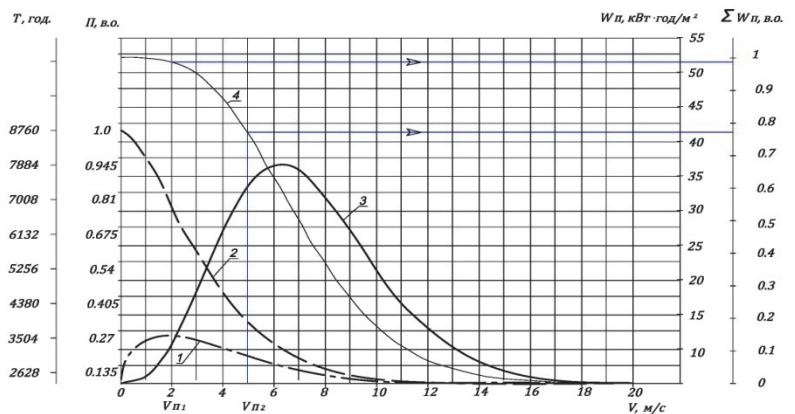


Рис. 35. Теоретичні показники річної тривалості роботи і питомого річного вітроенергетичного потенціалу

$$Z_n = \sum Z / Wh_{\text{веу}} = (\Pi + K_p + A) / Wh_{\text{веу}}, \text{ грн} / \text{кВт} \cdot \text{год}, \quad (36)$$

Де Π – середньорічні затрати на обслуговування, A – середня річна вартість використання витратних матеріалів; K_p – річна складова кредитування.

$$K_p = k_n \sum K_i + \sum k_a K_i = T_n^{-1} \sum K_i + \sum k_a K_i, \quad (37)$$

де T_n – розрахунковий термін окупності в роках; K_i – капіталовкладення із врахуванням транспортних і монтажних витрат; k_n , k_a – відповідно коефіцієнти кредитних і амортизаційних відрахувань.

Для окремої ВЕУ питомі зведені витрати можна визначати за виразом:

$$Z_e = [(k_n + k_a)K + \Pi + A] / Wh_p, \text{ грн} / \text{кВт} \cdot \text{год}. \quad (38)$$

Отримання достовірних абсолютних показників складових річних витрат для розробленої ВЕУ практично неможливе, тому економічний результат розраховували теоретичним порівнянням із базовим варіантом, у якого прийняті однаковими всі витратні складові, але різний обсяг річного виробітку електроенергії. Тоді економічний результат можна оцінити різницею зведених питомих витрат:

$$Z_1 - Z_2 = [(k_n + k_{a1})K + \Pi + A] / Wh_{p1} - [(k_n + k_{a2})K + \Pi + A] / Wh_{p2}. \quad (39)$$

За розрахованою різницею обсягів виробленої ВЕУ енергії на місцевості із середньорічною швидкістю вітру 4 м/с за визначеними пусковими

швидкостями вітру відповідно 1,5 і 3,5 м/с та загального ККД генератора із врахуванням ККД мультиплікатора для трилопатевої ВЕУ діаметром 7 м прийнято 0,6. Якщо прийняти собівартість (2014 р.) виробленої електроенергії ВЕК базового варіанту 2,5 грн/кВт·год, то за прийнятих попередніх умов собівартість енергії нового варіанта становитиме 1,5 грн/кВт·год, що менше на 40 %. Враховуючи діючий коефіцієнт «зеленого тарифу» для ВЕУ до 30 кВт (2,16) можна розрахувати рентабельність. За умов паритету капітальних витрат таке зниження собівартості дозволяє на таку ж величину зменшити термін окупності вітроенергетичного і електротехнічного обладнання.

ВИСНОВКИ

У дисертації вирішено важливу актуальну науково-прикладну проблему розробки науково-технічних основ безтрансмійних вітроелектричних комплексів на базі дугостаторних генераторів індукторного та вентильно-реактивного типів із коаксіальним кільцевим ротором, інтегрованим у конструкцію вітрової турбіни з допоміжним магнітним підвісом, що необхідно для побудови інноваційних вітроелектричних систем і ефективного використання вітроенергетичних ресурсів у аграрному виробництві та інших галузях.

У виконаній роботі отримані наступні основні результати досліджень.

1. На підставі різнобічного аналізу традиційних методів побудови вітроелектричних комплексів із типовим каскадом засобів електромеханічного перетворення енергії вітру та дослідженням прикладів ефективних удосконалень оцінені технічні перспективи і теоретичні межі мінімізації енергетичних втрат за рахунок відсутності трансмісійних ланок у аероелектромеханічній системі з оптимальною частотою обертання ротора і регульованим електронавантаженням, що дозволяє за технічних показників коефіцієнта потужності вітрової турбіни (C_p) в межах від 0,40 до 0,46 розрахувати теоретичний потенціал підвищення загального ККД вітроелектричних комплексів у 2–2,5 рази до близько 37 %.

2. Теоретичні передумови розробки безтрансмійних вітроелектричних комплексів базуються на раціональній послідовності побудови загальної функціональної схеми аероелектромеханічної системи, її параметричної моделі та математичних моделей енергетичного балансу і моментів, що дозволяє визначити узагальнену структуру електрогенератора з кільцевим ротором і статорними модулями індукторного та вентильно-реактивного типу, поєднаними у бездавачеву електромехатронну систему.

3. Запропоновані методологічні принципи побудови безтрансмійних вітроелектричних комплексів, які базуються на пріоритетах міжсистемних обмежень геометричних параметрів за ієрархією впливу на енергетичні процеси, що дозволяє ідентифікувати варіанти конфігурації електромагнітної системи дугостаторного індукторного електромеханічного перетворювача з коаксіальним кільцевим ротором, конструктивно інтегрованим з вітровою турбіною. Одночасно визначені критерії оцінки варіантів технічної реалізації допоміжного магнітного підвісу вітрової турбіни для розвантаження

вальницевого вузла горизонтальної осі від моменту сил ваги та розроблений алгоритм розрахункових операцій проектування безконтактних дугостаторних вітроелектричних індукторних генераторів з радіально-кільцевим ротором, де послідовність розрахункових програм визначається послідовно підпорядкованою взаємозалежністю конструктивних розмірів функціональних деталей аеромеханічної та електромагнітної систем.

4. Теоретичний аналіз електромагнітних систем магнітоелектричного і електромагнітного модулів дугостаторного генератора з кільцевим ротором методом поєднання теорії магнітних кіл і електромагнітних процесів у магнітостатичних кадрах координатного руху на розгортці дозволяє отримати коректні якісні залежності змінних напруг, струмів та взаємодії магнітних потоків реакції якоря з потоками збудження і встановити геометричні критерії побудови раціональної конструкції дво- і трипакетних магнітоелектричних модулів. Коловий метод дослідження дозволяє оцінити варіанти раціональних конструкцій магнітних систем та напрями оптимізації використання магнітних і електротехнічних матеріалів.

5. За результатами польового аналізу електромагнітних систем монопакетного і біпакетного модулів, що базувалася на побудові їх тривимірних геометричних моделей із заданими обмеженнями, обумовленими параметрами магнітних і електротехнічних матеріалів та формулюванням польової задачі за рівняннями Максвелла, запропонована методика розрахунку оптимального розміру індукторного елемента кільцевого ротора із формалізацією залежностей від потужності для різних за площею перетину магнітопровідних пакетів. Рівняння регресії оптимального розміру забезпечує високу точність близько 0,998 в діапазоні вказаних геометричних обмежень.

6. Польовий аналіз тривимірної моделі біпакетної магнітоелектричної системи підтвердив результати колових моделей про ефективність використання постійного магніту, однак із суттєвим уточненням результатів. Так значення загального магнітного потоку біпакетної системи не залишається весь час незмінним, а має максимальне значення у положенні на половину суміщених індукторних магнітопровідних елементів у обох пакетах, яке однак не перевищує 11 % його мінімального значення, що є прийнятним результатом. Отримані графічні залежності зміни магнітних потоків у кожному з двох пакетів показали ефективність передбачуваного явища почергового їх шунтування, що забезпечує співвідношення близько 4,5 між максимальним і мінімальним значенням, як вірогідно змінюється і магнітна провідність.

7. Розроблена імітаційна модель у програмі MATLAB/Simulink за принципом функціональної взаємодії польової та колової моделей дозволила отримати графічні залежності напруги, струму та потужності, які за формою практично підтверджують результати розрахунку методом електричного кола. Магнітоелектричний біпакетний модуль в режимі генератора забезпечує синусоподібний струм з найменшим коефіцієнтом спотворення синусоїди 0,19 % в режимі мінімальних навантажень, 0,23 % в режимі номінальних навантажень і найбільше 2,5 % в режимі короткого замикання. За графіком потужності при навантаженні визначені оптимальні значення струму та

активного опору і встановлені залежності цих значень при збільшенні швидкості.

8. Результати експериментальних досліджень за розробленими методиками та лабораторними стендами і експериментальними установками підтвердили наступні теоретичні розрахунки:

- збіжність експериментально визначеної магнітної провідності монопакетної системи і розрахованої у програмі COMSOL польової моделі близько 97 %.

- синусоїдоподібну форму ЕРС відповідно до дугових координат встановлення осі пакета статора в межах полюсного поділу кільцевого ротора з типовими показниками чутливості до технологічної точності виготовлення шихтованих полюсних елементів;

- відповідність експериментальних значень напруги розрахунковим величинам за різних схем комутації обмоток із різницею для струмів близько 5%.

9. Проведені функціональні випробування експериментального зразка безтрансмійної вітроенергетичної установки БВЕУ-01 згідно із затвердженим регламентним протоколом № 01-21-2016 від 07.11.2016 зразка вітроелектроустановки в реальних умовах підтвердили розрахункові та експериментальні показники ефективності використання енергії низькопотенціальних вітрових потоків за рахунок мінімізації пускового опору зрівноваженого магнітного моменту постійних магнітів; пасивний запуск у роботу вітротурбіни діаметром 7 м з кільцевим ротором діаметром 2 м відбувається за швидкості вітру близько 1 м/с; активний запуск за рахунок пускового імпульсу струму в обмотку електромагнітних модулів достовірно підтверджений за швидкості вітру близько 0,5 м/с і практично відразу починається робочий режим із відповідною до швидкості вітру потужністю навантаження, яка за мінімальної швидкості вітру 1 м/с становить близько 10 Вт, а питома потужність у розрахунку на 1 м² обв'язної площі за даної швидкості вітру становить близько 0,26 Вт/м², звідки розрахункове значення загального ККД вітроелектричного комплексу становить близько 36 %.

10. Результати дисертаційної роботи мають перспективу використання в технологіях проектування вітроелектричних комплексів для автономних і комбінованих систем та систем розосередженого генерування електроенергії в електромережах.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях України

1. Трегуб М. І., Клименко В. П. Технологічні аспекти використання вітроустановок в сільському господарстві. Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України. 2007. Вип. 10 (24). К. 2. С. 77–84. *(Здобувачем розроблено методи оцінки різносистемних критеріїв).*

2. Трегуб М. І. Обґрунтування типів та функціональних параметрів вітроустановок у сільському господарстві. Механізація та електрифікація сільського господарства. 2007. Вип. 91. С. 142–147.

3. Трегуб М. І. Підвищення ефективності використання відновлюваних джерел енергії в сільському господарстві. Вісник аграрної науки. 2008. № 6. С. 47–50.

4. Трегуб М. І. Обґрунтування автономної системи перетворення та використання вітрової енергії в сільському господарстві. Механізація та електрифікація сільського господарства. 2008. Вип. 92. С. 341–349.

5. Трегуб М. І. Обґрунтування геометричних параметрів ротора вітроустановки для пуску при малих швидкостях вітру. Механізація та електрифікація сільського господарства. 2009. Вип. 93. С. 303–309.

6. **Трегуб М. І.**, Клименко В. П. Підвищення енергоефективності лопатевого ротора сільськогосподарських вітроустановок. Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України. 2009. Вип. 13 (27). К. 2. С. 416–423. *(Здобувачем виконано обґрунтування методів розрахунку).*

7. **Трегуб М. І.**, Козирський В. В. Підвищення енергоефективності автономних сільськогосподарських вітроенергетичних систем. Нова тема. 2010. № 2. С. 47–50. *(Здобувачем виконано теоретичні порівняння аеромеханічних систем).*

8. Козирський В. В., **Трегуб М. І.** Обґрунтування методів підвищення пускового моменту сільськогосподарських вітроустановок. Вісник Національного університету біоресурсів та природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2010. Вип. 148. С. 18–28. *(Здобувачем виконано розробку конструкції та розрахунок моменту).*

9. Трегуб М. І. Вдосконалення сільськогосподарських вітроустановок. Механізація та електрифікація сільського господарства. 2010. Вип. 94. С. 357–364.

10. **Трегуб М. І.**, Козирський В. В. Підвищення ефективності використання поновлюваних видів енергії в сільському господарстві. Електрифікація та автоматизація сільського господарства. 2010. № 1. 12. с. *(Здобувачем виконано теоретичні розрахунки та графіки).*

11. Козирський В. В., **Трегуб М. І.**, Петренко А. В. Визначення напрямів підвищення енергоефективності автономних вітроенергетичних систем Науковий вісник Національного університету біоресурсів та природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2011. Вип. 166. Ч. 3. С. 22–31. *(Здобувачем виконано оцінку конструктивних варіантів безтрансмійних систем).*

12. Синєглазов В. М., Козирський В. В., **Трегуб М. І.** Оптимізація геометричних параметрів лопатей вітроустановок для пуску та роботи за малих швидкостей вітру. Електроніка та системи управління. 2011. № 1 (27). С. 94–102. *(Здобувачем виконано теоретичні розрахунки аеродинамічних сил та схеми).*

13. **Трегуб М. І.**, Клименко В. П. Обґрунтування функціональних параметрів вітроустановок для використання низькопотенціальних вітрових потоків. *Техніка і технології АПК*. 2011. № 1 (16). С. 14–17. *(Здобувачем виконано узагальнення результатів досліджень безтрансмисійних вітроустановок)*.

14. Трегуб М. І. Підвищення показників пуску і електромеханічного перетворення вітроустановок для роботи за низької швидкості вітрів. *Механізація та електрифікація сільського господарства*. 2011. Вип. 95. С. 295–308.

15. **Трегуб Н. И.**, Гребеников В. В., Приймак М. В. Обоснование типов и параметров электрогенераторов для безредукторных ветроэлектрических установок. *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України*. 2012. Вип. 31. С. 67–73. *(Здобувачем виконано розроблення схем моделей та розрахунок електромагнітних систем)*.

16. Трегуб М. І. Обґрунтування типів електрогенераторів для безредукторних вітроелектричних установок. *Механізація та електрифікація сільського господарства*. 2012. Вип. 96. С. 471–481.

17. **Трегуб М. І.**, Василенко О. С. Обґрунтування методів зрівноважування магнітних моментів та безконтактної стабілізації зазору аксіального магнітоелектричного дугостаторного вітрогенератора. *Механізація та електрифікація сільського господарства*. 2013. Вип. 97. С. 326–334.

18. **Трегуб М. І.**, Василенко О. С. Обґрунтування методів підвищення аеродинамічної енергоефективності безредукторної вітроустановки із кільцевим ротором дугостаторного генератора. *Механізація та електрифікація сільського господарства*. 2013. Вип. 98. С. 370–379.

19. Козирський В. В., **Трегуб М. І.**, Петренко А. В. Обґрунтування принципів адаптивного регулювання навантаження автономних вітроелектричних установок. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК*. 2013. Вип. 184. Ч. 2. С. 10–17. *(Здобувачем розглянуто принципи адаптивного регулювання навантаження автономних установок)*.

Статті у наукових фахових виданнях України,

включених до міжнародних наукометричних баз даних:

19. Sineglazov V. M., Kozyrskyy V. V., **Trehub M. I.** Justification of aerodynamic efficiency increase methods in gearless horizontal axis wind turbines. *Electronics and Control Systems*. 2013. № 1 (35). P. 67–74. *(Здобувачем виконано теоретичні обґрунтування)*.

20. Sineglazov V. M., Kozyrskyy V. V., **Trehub M. I.**, Vasilenko O. S. Substantiation of adaptive self-adjusting system of autonomous wind power installation. *Electronics and Control Systems*. 2013. № 4 (38). P. 124–130. *(Здобувачем виконано теоретичні розрахунки)*.

21. Козырский В. В., **Трегуб Н. И.**, Гребенников В. В., Приймак М. В. Обоснование методов уравнивания магнитного момента дугостаторного

магнітоелектрического генератора с кольцевым ротором. Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України. 2013. Вип. 36. С. 64–71. *(Здобувачем виконано теоретичні обґрунтування аналітичних залежностей та конструктивні рішення).*

22. Козирський В. В., **Трегуб М. І.** Оптимізація геометричних параметрів кільцевого ротора дугостаторного вітроелектричного генератора. Науковий вісник Національного університету біоресурсів та природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2014. Вип. 194. Ч. 3. С. 18–28. *(Здобувачем розроблено методи оптимізації).*

23. **Трегуб М. І.**, Рубець А. М., Василенко О. С. Оцінка техніко-економічного результату вдосконалення автономної сільськогосподарської вітроенергетичної системи. Механізація та електрифікація сільського господарства. 2014. Вип. 99. С. 370–379. *(Здобувачем виконано побудову номограми за розподілом Вейбула).*

24. Sineglazov V. M., Kozyrsky V. V., **Trehub M. I.**, Vasilenko O. S. Substantiation of adaptive self-adjusting system of autonomous wind energy turbine. Electronics and Control Systems. 2015. № 2 (44). P. 62–68. *(Здобувачем розроблено схеми і алгоритми).*

25. Козирський В. В., **Трегуб М. І.**, Петренко А. В., Василенко О. С. Обґрунтування магнітної системи дугостаторного генератора з кільцевим ротором. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2017. Вип. 268. С. 7–15. *(Здобувачем виконано польовий аналіз).*

Стаття у науковому виданні іншої держави

26. Трегуб Н. И. Обоснование геометрических параметров и типа активных элементов кольцеобразного ротора ветроэлектрического генератора. Альтернативная энергетика и экология. 2013. № 13. С. 32–35.

Стаття в науковому виданні,

включеному до міжнародних наукометричних баз даних:

27. Трегуб М. І. Обґрунтування магнітної системи дугостаторного вітроелектричного генератора з кільцевим ротором. Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України. 2014. Вип. 39. С. 57–64.

Статті в інших наукових виданнях

28. Трегуб М. І. Залежність вагових параметрів електромобільної сільсько-господарської машини від ємності та типу акумуляторних батарей. Вісник Білоцерківського державного аграрного університету. 1998. Вип. 4. Ч. 2. С. 108–110.

29. Трегуб М. І. Застосування поновлюваних джерел енергії у сільськогосподарському виробництві. Вісник Білоцерківського державного аграрного університету. 1999. Вип. 3. Ч. 2. С. 110–112.

30. Трегуб М. І. Енергетика в системі сталого розвитку аграрного виробництва. Агробіологія. 2011. Вип. 6 (86). С. 147–153.

31. Мартиненко І. І., **Трегуб М. І.** Екологічні та технологічні аспекти використання поновлюваних енергоджерел у сільському господарстві України. Електрифікація та автоматизація сільського господарства. 2002. № 1. С. 10–15. *(Здобувачем виконано дослідження літературних джерел та зроблено оцінку ефективності конструкцій вітроустановок).*

32. Трегуб М. І. Зменшення впливу нерівномірності вітру на стабільність роботи автономного вітроагрегата. Електрифікація та автоматизація сільського господарства. 2003. № 2. С. 82–90.

Рекомендації та методичні вказівки:

33. Кравчук В. І., Погорілий В. В., Постельга С. С., Таргоня В. С., Рудик Л. О., Даниленко А. С., **Трегуб М. І.**, Василенко О. С. Рекомендації щодо обґрунтування параметрів вітроенергетичного та геліоенергетичного обладнання при розробці комбінованих вітросонячних комплексів для технологічних процесів сільськогосподарського виробництва. Біла Церква – Дослідницьке, 2016. 36 с. *(Здобувачем виконано розроблення вітроелектричних комплексів).*

34. Козирський В. В., **Трегуб М. І.**, Петренко А. В. Методичні вказівки щодо виконання практичних робіт з дисципліни «Нетрадиційні та поновлювані джерела енергії». К., 2016. 71 с. *(Здобувачем взято участь в розробленні методичних вказівок).*

Патенти України на винахід:

35. Трегуб М. І. Патент на винахід № 102445 України. МПК (2006.01) H02K19/16, 19/20, 21/26, H02P 9/10. Спосіб перетворення механічної енергії в електричну. № а 2011 13345; заявлено 14.11.2011; опубліковано 10.07.2013; Бюл. № 13.

36. Трегуб М. І. Патент на винахід № 110835 UA. МПК (2006.01) H02K 19/20, 16/04, 21/38. Спосіб каскадного перетворення механічної енергії в електричну. № а 2013 15053; заявлено 23.12.2013; опубліковано 25.02.2016; Бюл. № 4.

37. **Трегуб М. І.**, Козирський В. В. Патент на винахід № 101118 UA. МПК H02K19/20, H02K21/38. Індукторний аксіальний генератор. № а 2012 00837; заявлено 27.01.2012; опубліковано 25.02.2013; Бюл. № 4. *(Здобувачем взято участь у розробленні електромеханічної системи та оформленні заявки).*

38. **Трегуб М. І.**, Козирський В. В. Патент на винахід № 95048 України. МПК H02K21/38, H02K21/48, H02P9/10. Індукторний дуговий електрогенератор. № а 2010 12001; заявлено 11.10.2010; опубліковано 25.06.2011; Бюл. № 12. *(Здобувачем взято участь у розробленні конструкції та оформленні заявки).*

39. **Трегуб М. І.**, Козирський В. В. Патент на винахід № 91779 України. МПК H02K21/00, H02K21/14. Електрогенератор з комбінованим збудженням. № а 2009 00977; заявлено 09.02.2009; опубліковано 25.08.2010; Бюл. № 16. *(Здобувач взято участь у розробленні принципової схеми та оформленні заявки).*

40. **Трегуб М. І.**, Василенко О. С. Патент на винахід № 106804 України. МПК (2014.01) F03D1/00, F03D1/06 (2006.01). Безредукторна електромеханічна вітроустановка. № а 2013 01021; заявлено 28.01.2013; опубліковано 10.10.2014; Бюл. № 19. *(Здобувачем взято участь у розробленні загальної схеми, конструктивному виконанні та оформленні заявки).*

Патенти України на корисну модель:

41. Трегуб М. І. Патент на корисну модель № 58873 України. МПК F03D 1/00. Вітродвигун № 2002 119074; заявлено 14.11.2002; опубліковано 15.08.2003; Бюл. № 8.

42. Трегуб М. І. Патент на корисну модель. № 68628 України. МПК F03D 1/06, F04D 29/30. Лопать вітродвигуна. № 2003 088070; заявлено 29.08.2003; опубліковано 16.08.2004; Бюл. № 8.

43. Трегуб М. І. Патент на корисну модель № 11148 України. МПК F03D 9/00. Вітроагрегат. № 2005 05049; заявлено 27.05.2005; опубліковано 15.12.2005; Бюл. № 12.

44. Трегуб М. І. Патент на корисну модель. № 18641 України. МПК G01P 5/02. Дистанційний анеморумбометр. № u 2006 05538; заявлено 22.05.2006; опубліковано 15.11.2006; Бюл. № 11.

45. Трегуб М. І. Патент на корисну модель № 17940 України. МПК F03D 9/02, C02F 1/74. Вітроустановка для аерації води. № 2006 04601; заявлено 25.04.2006; опубліковано 16.10.2006; Бюл. № 10.

46. Трегуб М. І. Патент на корисну модель № 21977 України. МПК F03D 1/04, F03G 7/00. Геліовітроенергетична установка. № 2006 11620; заявлено 03.11.2006; опубліковано 10.04.2007; Бюл. № 4.

47. Трегуб М. І. Патент на корисну модель № 32851 України. МПК F03D 1/00. Безредукторна вітроенергетична установка. № 2007 02848; заявлено 19.03.2007; опубліковано 10.06.2008; Бюл. № 11.

48. Козирський В. В., **Трегуб М. І.** Патент на корисну модель № 41311 України. МПК F03D 1/00, F03D 3/02. Лопатевий ротор вітроустановки. № u 2009 00467; заявлено 22.01.2009; опубліковано 10.05.2009; Бюл. № 9. *(Здобувачем взято участь у розробленні лопатевого ротора з регулятором та оформленні заявки).*

49. **Трегуб М. І.**, Козирський В. В. Патент на корисну модель № 446 України. МПК H02K21/00. Безконтактний комбінований електрогенератор. № u 2009 04029; заявлено 24.04.2009; опубліковано 12.10.2009; Бюл. № 19. *(Здобувачем взято участь у розробленні ідеї та оформленні заявки).*

50. **Трегуб М. І.**, Козирський В. В. Патент на корисну модель № 51982 України. МПК G01L 3/12, G01P 3/00. Безконтактний вимірювач крутного моменту і частоти обертання вала. № u 2010 01115; заявлено 03.02.2010; опубліковано 10.08.2010; Бюл. № 15. *(Здобувачем взято участь у розробленні принципової схеми і конструктивного виконання та оформленні заявки).*

51. Трегуб М. І. Патент на корисну модель № 60418 України. МПК F03D 1/00, F03D 11/00. Лопать вітроустановки. № u 2010 10794; заявлено 07.09.2010; опубліковано 25.06.2011; Бюл. № 12.

52. **Трегуб М. І.**, Гребеніков В. В., Приймак М. В. Патент на корисну модель № 71835 України. МПК H02K21/12, H02K21/24. Магнітоелектричний аксіальний генератор. № u 2012 01144; заявлено 06.02.2012; опубліковано 25.07.2012; Бюл. № 14. *(Здобувачем взято участь у розробленні ідеї та оформленні заявки).*

53. **Трегуб М. І.**, Гребеніков В. В., Приймак М. В. Патент на корисну модель № 79084 UA. МПК H02K21/12, H02K21/24. Аксіальний магнітоелектричний генератор. № u 2012 011863; заявлено 15.10.2012; опубліковано 10.04.2013; Бюл. № 7. *(Здобувачем взято участь у розробленні принципу дії генератора та оформленні заявки).*

54. **Трегуб М. І.**, Василенко О. С. Патент на корисну модель № 101118 України. МПК (2013.01) F03D 1/00. Безредукторна електромеханічна вітроустановка. № u 2012 12856; заявлено 12.11.2012; опубліковано 25.04.2013; Бюл. № 8. *(Здобувачем взято участь у розробленні технічної ідеї та оформленні заявки).*

55. Трегуб М. І. Патент на корисну модель № 82359 України. МПК (2006.01) H02K19/16, 19/20,21/26, H02P 9/10. Спосіб перетворення механічної енергії в електричну. № u 2013 02723; заявлено 04.03.2013; опубліковано 25.07.2013; Бюл. № 14.

56. Трегуб М. І. Патент на корисну модель № 88770 України. МПК (2014.01) H02K 19/00. Спосіб каскадного перетворення механічної енергії в електричну. № u 2013 13740; заявлено 26.11.2013; опубліковано 25.03.2014; Бюл. № 6.

57. Трегуб М. І. Патент на корисну модель № 91801 України. МПК (2006.01) H02K 19/20, 21/38. Індукторний біпакетний генератор. № u 2014 02729; заявлено 18.03.2014; опубліковано 10.07.2014; Бюл. № 13.

Тези наукових доповідей:

58. **Трегуб М. І.**, Клименко В. П. Особливості використання вітрової енергії в сільському господарстві. Відновлювана енергетика XXI століття: VII Міжнародна конференція, смт Миколаївка, Автономна Республіка Крим, 17–21 вересня 2007 року: тези доповіді. Крим, 2007. С. 124–126. *(Здобувачем виконано теоретичний аналіз систем та висновки).*

59. Трегуб М. І. Напрямки підвищення енергетичної ефективності сільсько-господарських вітроустановок. Відновлювана енергетика XXI століття: IX Міжнародна конференція, смт Миколаївка, Автономна Республіка Крим, 2008. С. 176–178.

60. **Трегуб М. І.**, Ланін Е. В. Історичні аспекти етапів розвитку вітроенергетики. Актуальні питання історії техніки: 6 Всеукраїнська наукова конференція. К., 2009. С. 46–48. *(Здобувачем виконано оцінку визначних прикладів принципів удосконалень вітроустановок).*

61. **Tregub M.** Increasing of aerodynamic efficiency of no-gear unit wind turbine with circular rotor ofarc-type drive (in Ukrainian). 8th International Green Energy Conference, Kyiv, Ukraine, June 17–19. 2013.

62. Козирський В. В., **Трегуб М. І.** Методологія вибору типу і геометричної конфігурації кільцевороторного дугостаторного генератора безредукторної вітроелектричної установки. Проблеми та перспективи розвитку енергетики, електротехнологій та автоматики в АПК: Міжнародна науково-практична конференція, м. Київ, 5–6 листопада 2013 року: тези доповіді. С. 57–58. (*Здобувачем розроблено цільові функції та міжсистемні обмеження*).

63. Трегуб Н. И. Обоснование методики оптимизации параметров кольцевороторного дугостаторного ветроэлектрического генератора. Возобновляемые источники энергии: Международный семинар экспертов, г. Минск, Республика Беларусь, 3–4 декабря 2013 года: тезисы доклада. Минск, 2013. С. 121–130.

64. Трегуб М. І. Обґрунтування методів оптимізації геометричних параметрів індукторного кільцевороторного дугостаторного вітроелектричного генератора. Проблеми сучасної енергетики і автоматики в системі природокористування: Міжнародна науково-технічна конференція, м. Київ, 15–20 квітня 2014 року: тези доповіді. К., 2014. С. 24–26.

АНОТАЦІЯ

Трегуб М.І. Науково-технічні основи безтрансмісійних вітроелектричних комплексів. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи. Національний університет біоресурсів і природокористування України, Київ, 2018 р.

Дисертація присвячена вирішенню важливої актуальної науково-прикладної проблеми створення науково-технічних основ побудови безтрансмісійних вітроелектричних комплексів з виконанням кільцевого ротора на вітровій турбіні для розширення діапазону робочих швидкостей вітру.

Актуальність теми обумовлена необхідністю доповнення науково-технічної бази побудови безтрансмісійних вітроелектричних комплексів, що відповідає сучасній тенденції переходу провідних виробників на безмультиплікаторні вітроелектричні установки.

Встановлені залежності конструктивних умов мінімізації магнітного моменту кільцевого ротора з феромагнітними полюсами у робочому повітряному проміжку дугового статора для зменшення пускового опору і магнітних пульсацій під час роботи. Основні результати роботи передані виробничим підприємствам енергетичного обладнання та сільськогосподарського машинобудування, де використані в процесах розробки та виготовлення експериментальних зразків безтрансмісійних вітроустановок, видані рекомендації для проектування комбінованих вітрогеліоколекторних систем.

Методичні вказівки і лабораторний стенд впроваджені у навчальний процес Національного університету біоресурсів і природокористування України та Білоцерківського національного аграрного університету.

Ключові слова: безтрансмiсiйний вiтроелектричний комплекс, дугостаторний iндукторний та вентиляно-реактивний генератор, кiльцевий ротор.

АННОТАЦІЯ

Трегуб Н.И. Научно-технические основы бестрансмиссионных ветроэлектрических комплексов. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.09.03 – электротехнические комплексы и системы. Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины, Киев, 2018.

Диссертация посвящена решению важной актуальной научно-прикладной проблемы создания научно-технических основ бестрансмиссионных ветроэлектрических комплексов с размещением кольцевого ротора в одном блоке с ветровой турбиной для расширения диапазона использования минимальных рабочих скоростей ветра.

Тема диссертации обусловлена необходимостью развития научно-технической методологии создания бестрансмиссионных электромеханических систем ветроэлектрических комплексов, что соответствует новой мировой тенденции перехода ведущих производителей на безмультипликаторные ветроэлектрические установки с новейшей силовой электроникой.

Разработаны аналитические методы и общие расчетные методики проектирования ветроэлектрических комплексов на базе низкооборотных бестрансмиссионных дугостаторных индукторных генераторов с кольцевым ротором.

Основные результаты работы переданы конструкторским отделам предприятий энергетического оборудования и сельскохозяйственного машиностроения, где использованы при разработке и изготовления опытных образцов бестрансмиссионных ветроустановок различных типоразмеров по результатам испытания которых изданы рекомендации. Учебно-методические разработки и лабораторный стенд используют в учебном процессе Национального университета биоресурсов и природопользования Украины.

Ключевые слова: бестрансмиссионный ветроэлектрический комплекс, дугостаторный индукторный и вентиляно-реактивный генератор, кольцеобразный ротор.

ANNOTATION

Tregub M. I. Scientific and technical bases of transmissionless wind power complexes. – The Manuscript.

Dissertation for the degree of the Doctor of Technical Sciences, specialty 05.09.03–Electrotechnical complexes and systems. National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, 2018.

The dissertation is devoted to the development of scientific and technical bases for the improvement of transmissionless wind electric complexes (WEC) in order to increase their energy efficiency by creating a new type of wind power installation (WPI) on the basis of a new electrical generator with a rational interaction of it in the

mode of maximum power of a wind turbine (WT) with adjustable electric load. As a result of solving a complex of interrelated problems, the theoretical and technical basis for the design of the new generation is created, where the general design of the wind turbine, the types of blades, the impassable inductive-reactive electromechatronic system of a arc-stator generator with a ring rotor, a cascade method of converting mechanical energy into electric. The principle novelty of technical solutions is reflected in 6 patents of Ukraine for inventions and 17 patents for utility models.

The technical level of traditional WEC on the basis of transmission generator sets and typical control systems still does not allow to effectively use local wind energy (WE) in agrarian production of Ukraine, where on the majority of its territory its average speed does not exceed 4.5 m/s, in which the use of WPI from low technical indicators is considered economically inexpedient. Currently, Chen H., Darie E., Dixon J., Hao C., Ogawa K, and Mueller M. are promising innovations based on switched reluctance generators with wind turbine maximum power control systems. However, even the most recent WEC of leading companies in the world are still projecting according to traditional principles based on the existing scientific and technical base, which needs substantial improvement. However, even the most recent WEI of leading firms in the world still design according to traditional principles based on the existing scientific and technical base, which needs substantial improvement. In particular, the search for effective ways to increase the velocity of the induction elements of no transmission low-turn generators, the expansion of the range of their capacities in the mode of maximum use of the WE at the same time at the minimum cost of electrical materials is still ongoing.

According to the results of the generalization of the conclusions of theoretical and experimental research, a new scientific and technical concept of constructing innovative WEC based on non-transmitted arc stator induction and gate-reactive generators with a multi-pole coaxial ring rotor on a wind turbine has been substantiated, which, in contrast to the existing ones under the same conditions, provides a higher induction frequency, better manageability and a wider range of working capacities. The basis of the scientific and technical concept is the hierarchy of subordination of the target functions of the aeromechanical and electromechanical systems according to the degree of influence on the overall energy process.

The new constructive scheme of the WEI is analyzed for the influence on aerodynamic processes using the theory of vortex movement of air environments and the assessment of the impact of the micro-relief of the wind tunnel surface of the WEI. The theoretical positions of constructing mathematical models of the wind electromechanical system according to the scheme of interconnected objective parameters of the aeromechanical, magnetic and electrical subsystems are supplemented and justified on the basis of the balance of moments, a new principle of adaptive control of the WEC. The functional scheme of the WEC, in which the algorithms of distribution of the electric power received from the wind flow into two channels are grounded, one of which is adjustable, depending on the power consumption of autonomous load and instantaneous power of the wind turbine. The expediency of the energy utilization channel WEC with the regulated load is

substantiated not only in systems of autonomous type, but also in systems operated by the electricity system in the hours of daily electricity consumption failures in the power system. In this case, the energy advantages of the energy utilization channel of the electromechanical transformation of the WE with the minimum number of stages of energy transformations and less losses are substantiated. The estimated general technical requirements of energy consumption in various agricultural technological processes, which can be as energy utilization, for example, electrothermal, electrochemical, optical.

In line with the created scientific and technical concept, a new methodological approach to the typological and constructive design of contactless duplex aerial electromechanical converters with a coaxial ring rotor and its ferromagnetic pole elements and an auxiliary magnetic suspension in the working air gap on the basis of the energy hierarchy of cross-system target functions was developed. At the same time solved the problems of rational configuration of a magnetic system with a coaxial ring rotor on which the passive ferromagnetic pole elements are installed. For such an electromechanical system, a new theoretical base of calculation was required, which is essentially different from the ones existing for typical electric machines. Proceeding from the justified restrictions, the problem of analyzing the electromechanical system based on the theory of magnetic circles and field methods was made. The analytical method analyzes the energy processes of electromechanical transformations in the WEC on the basis of an induction arc stator power generator with a ring rotor. The functional and mathematical models of the aeromechanical system with lumped parameters are constructed. The mathematical model in the form of a system of equations of the balance of torques has allowed to describe the functional dependencies of the controlled electromagnetic torque with the regulated load current and to develop an electrical scheme for the implementation of a non-radiation electromechanical system with cascade excitation of valve-reagent modules of an arc stator. It is established that a rational version of implementation of separate modules of an arc stator in the proposed electromechanical system is a monoblock magnetolectric type that constantly operates in a generator mode with the simultaneous identification of the position of the ring rotor and a different number of single-packet modules of the electromagnetic type on a common housing, which, with the help of a microcontroller, operate in the valve mode jet electric machine. The construction of such a system provides continuous controlled navigation of the WEI in adaptive mode, since the maximum power of the WT is fundamentally possible only at a variable speed of its rotation when changing the wind speed.

For the first time the methodology of optimization of radial geometric dimensions of a ring rotor was grounded on the basis of a joint analysis of the restrictions of the objective functions and laws of aeromechanical and electrodynamics of aeromechanical and electromagnetic systems. The laboratory bench of the axial low-rotation generator was produced and methodological guidelines for laboratory and practical works of the Faculty of Energy and Automatics in National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine.

Key words: wind-electric complex, wind-electric installation, transmissionless, inductor-jet generator, arc stator, ring rotor, field analysis.

Підписано до друку 15.11.18
Ум. друк. арк. 1,9
Наклад 100 прим.

Формат 60x84\16
Обл.-вид.арк.1,9
Зам. № 180179

Віддруковано у редакційно-видавничому відділі НУБіП України
вул. Героїв Оборони, 15, Київ, 03041
тел.: 527-81-55

