

УДК 621.3.078.4

DOI: 10.15587/1729-4061.2022.263432

Розробка системи керування відбором максимальної потужності автономної вітрової установки із синхронним магнітоелектричним генератором

М. Я. Островерхов, В. В. Чумак, М. А. Коваленко, І. Я. Коваленко

Об'єктом дослідження є електромеханічні процеси в автономній вітроелектричній установці з магнітоелектричним генератором.

В реальних умовах швидкість вітру постійно змінюється. Вітроагрегат працює максимально ефективно лише за номінального значення швидкості вітру. При зміні швидкості вітру ефективність перетворення механічної енергії вітру в електричну падає. Керування потужністю електрогенератора при зміні швидкості вітру є актуальною науково-технічною проблемою.

Розроблено та досліджено систему керування відбором максимальної потужності на основі параметрів експериментального зразка синхронного магнітоелектричного генератора. Особливістю синтезованої системи керування є те, що вона розроблена на основі концепції зворотних задач динаміки в поєднанні з мінімізацією локальних функціоналів миттєвих значень енергій. Закон керування забезпечує слабку чутливість до параметричних збурень об'єкта та здійснює динамічну декомпозицію взаємозалежної нелінійної системи, що зумовлює його практичну реалізацію. Отримано перехідні процеси потужності, напруги та струму статора, напруги та струму збудження при зміні швидкості вітру від 3 до 8 м/с, а також при зміні активного електричного опору навантаження.

Отримані результати дослідження підтверджують ефективність роботи системи керування відбором максимальної потужності при зміні швидкості вітру та навантаження. При зміні швидкості вітру в межах 3–8 м/с та навантаження на 50 % ефективність перетворення механічної енергії вітру в електричну зростає на 15–40 % в порівнянні з традиційною магнітоелектричною системою.

Результати дослідження рекомендується до практичного використання в автономних енергоустановках на основі вітроагрегатів з генераторами із постійними магнітами.

Ключові слова: автономна вітроелектрична установка, керування потужністю, синхронний магнітоелектричний генератор, миттєва енергія.

1. Вступ

Автономні вітрогенераторні установки активно використовуються для електропостачання віддалених будов та споруд. Типова система електропостачання складається з вітрогенератора, акумуляторного блоку, контролера заряду акумуляторних батарей та інвертора, за допомогою якого забезпечується необхідна амплітуда і частота напруги споживача.

В якості електричних генераторів вітроустановок найбільшого поширення набули трифазні синхронні генератори з постійними магнітами (Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG)), які мають високі техніко-економічні

показники. Основним недоліком цих генераторів є відсутність ефективних методів керування магнітним потоком, що обмежує оптимізацію енергетичного балансу вітроустановки.

У процесі роботи вітрогенераторної установки змінюється швидкість вітру і відповідно кількість генерованої електроенергії. Потужність вітрового потоку залежить у кубі від швидкості вітру. Механічна характеристика вітрової турбіни має точку максимальної потужності. Дуже важливим є вирішення проблеми щодо відбору максимальної потужності турбіни в умовах зміни швидкості вітру.

Якісне керування координатами синхронного генератора також пов'язане з вирішенням ще декількох проблем. Акумуляторна батарея, як електричне навантаження синхронного генератора вітрової установки, є нелінійним елементом. Величина внутрішнього опору батареї залежить від рівня її заряду. Інша проблема зумовлена параметричними збуреннями. У процесі роботи генератора змінюється його температура і як наслідок змінюються значення електричних опорів його обмоток. Вихідні значення параметрів генератора можуть бути неточно обчислені, що зумовлено похибками відповідних методик. Інша проблема обумовлена координатними збуреннями, оскільки синхронний генератор описується взаємозалежною системою диференціальних рівнянь.

Вирішення зазначених проблем класичними методами теорії автоматичного керування призводить до запровадження додаткових систем ідентифікації, адаптації та/або компенсації, що збільшує громіздкість системи в цілому.

Актуальним науково-практичним напрямком є дослідження ефективності перетворення механічної енергії вітру в електричну автономної вітроелектричної установки на основі магнітоелектричного синхронного генератора. Одним із запропонованих методів є використання додаткової обмотки збудження генератора. Оцінці ефективності такого підходу присвячена дана робота.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

В роботі [1] досліджується гібридна система до складу якої входить вітроелектрична установка із синхронним генератором із постійними магнітами. Система працює через перетворювач на акумуляторні батареї. В якості навантаження використовується автономна система перетворення енергії вітру. Однак потік вітру за своєю природою є переривчастий. З метою забезпечення безперервної подачі електроенергії авторами запропоновано систему накопичування енергії в потужних акумуляторних батареях. Ця система використовуються як резервна, що активується при надлишку або недостатці вітрового потоку. Запропоновано систему керування зарядом та розрядом батареї для забезпечення ефективного балансу механічної та електричної потужності. Не дивлячись на ефективність такого підходу, реалізація запропонованого методу керування вихідними параметрами є складними і дорогими.

У роботі [2] запропоновано схему керування автономною системою перетворення енергії вітру. Дана система використовується для забезпечення як автономних систем, так і для роботи паралельно з мережею. Для забезпечення безперервної подачі електроенергії використовується резервний накопичувач

електроенергії. Досліджено стійкість вітроелектричної системи потужністю 4 кВт із резервним накопичувачем. В якості навантаження використовувалось автономне навантаження постійного струму потужністю 3 кВт, що представляє базову телекомунікаційну станцію. Недоліком використання запропонованої системи є недостатня маневреність та обмеження по максимально можливій потужності вихідного навантаження.

В статті [3] представлено проектування та моделювання нечітко пропорційного інтегрального (Fuzzy-PI) контролера, що використовується для максимізації передачі енергії автономною системою перетворення енергії вітру. Якщо використовувати Fuzzy-PI контролер у складі автономної вітроелектричної установки це покращує продуктивність системи в порівнянні з класичним PI контролером. Використання запропонованого контролера дозволяє отримати покращені результати за рахунок регулювання швидкості ротора синхронного генератора з постійними магнітами при зміні швидкості вітру. Результати моделювання в середовищі Matlab/Simulink, представлені авторами в роботі, показують ефективність і хороші характеристики запропонованої розробленої системи. Однак яким чином практично реалізувати систему зміни швидкості обертання ротора при зміні швидкості вітру, невідомо.

В роботі [4] описується Н-метод керування вітрогенераторами при змінній швидкості вітру, що становить нижче номінальної, та при частковому навантаженні. При швидкості вітру нижче номінальної цілі керування полягають у максимізації перетворення енергії та мінімізації динамічних навантажень. Підхід Н-методу керування заснований на межі сектора нелінійності для боротьби з шумом, що впливає на вимірювання швидкості ротора та аеродинамічних збурень. Результати моделювання показують, що запропонований Н-контролер гарантує надійну роботу та швидко реагує на зміни швидкості вітру для відстеження оптимальної швидкості ротора. Максимальну ефективність можна досягти, постійно регулюючи швидкість ротора та оновлюючи навантаження генератора, щоб максимізувати потужність та зменшити перехідні навантаження крутного моменту трансмісії. Однак недолік такої системи полягає в складності реалізації, складному алгоритмі керування та дороговизні кінцевого продукту.

Система керування багатополюсним безредукторним синхронним генератором описана в роботі [5]. Такі системи є одними із найперспективнішими для вітрових турбін високої потужності через їх високу ефективність. В даній роботі пропонується система генерації вітрових турбін на основі з простим діодним випрямлячем, що використовує систему компенсації магнітної енергії генератора при зміні навантаження. Хоча діодний випрямляч є більш простим, надійним і недорогим, ніж активний випрямляч, сам по собі діодний випрямляч не здатний керувати реактивною потужністю. Тобто, в даній роботі пропонується система перетворення енергії вітру з діодним випрямлячем та системою компенсації магнітної енергії. Ця система функціонує як змінний конденсатор і дозволяє керувати крутним моментом генератора, так що максимальна потужність при зміні вітру, реалізується керуванням конденсаторів. Однак діапазон регулювання вихідної потужності такої системи складає всього 5–12 %, що є

малоефективним. Крім того, потужні конденсатори є дороговартісним елементом такої системи.

В роботі [6] розглядають гібридну систему з вітроустановкою та сонячними панелями при паралельній роботі системи на мережу. Гібридний блок накопичення енергії вітру складається з батареї та модуля суперконденсатора. Показано ефективність різних комбінацій додаткових взаємозв'язків і демпфування, що дозволяє формувати потрібні потоки енергії всередині замкнутої системи. Це дозволяє забезпечити бажані результати керування. Серед цих завдань є завдання підтримки напруги на шині постійного струму та модулі суперконденсатора на еталонних рівнях, та плавність перехідних процесів струму батареї. Проведено порівняльні імітаційні дослідження на комп'ютерній моделі енергетичного комплексу з синтезованими системами керування, створеної в середовищі MATLAB/Simulink. З іншого боку, не показано ефективність роботи такої системи в автономному режимі та при низьких значеннях швидкості вітру.

Отримання параметрів і характеристик синхронної машини з постійними магнітами у складі із вітровою турбіною за результатами попередньо проведеного польового електромагнітного розрахунку показано в роботі [7]. Результати отримано із використанням методу скінченних елементів. В програмному пакеті побудовано комп'ютерна імітаційна модель синхронного генератора із механічним навантаженням. Модель побудовано із врахуванням магнітного насичення відносно осі d і осі q ротора. Механічне навантаження генератора задається для кожної точки механічної характеристики вітрової турбіни окремо. Це збільшує трудоемність та час моделювання і не дозволяє в повній мірі врахувати зміну параметрів ротора вітроустановки при зміні навантаження генератора.

Метод підвищення точності та зменшення чутливості параметрів вітрогенеруючої установки на основі багатокритеріального синтезу нелінійного робастного керування з двома ступенями свободи показано в роботі [8]. Синтез нелінійних робастних регуляторів та нелінійних робастних спостерігачів зводиться до розв'язання рівнянь Гамільтона-Якобі-Айзекса. Вектор мети робастного керування визначається на основі рішення завдання багатокритеріального нелінійного програмування. Вектором цільової функції є показники ефективності перетворення механічної енергії вітру в електричну. Ця векторна цільова функція обчислюється під час моделювання синтезованої системи в різних режимах роботи з різними вхідними сигналами та для різних значень параметрів об'єкту керування. Робота системи при максимальних піках механічної потужності вітрової турбіни не досліджувалась.

Проблему керування вихідними параметрами автономної системи перетворення енергії вітру з акумулятором розглянуто в [9]. Система складається з послідовного з'єднання синхронного генератора з постійними магнітами, некерованого випрямляча, перетворювача, літій-іонної батареї та навантаження постійного струму. Переривчастий характер вітрового потоку, а також часті зміни в навантаженні зменшують термін служби батареї та знижують продуктивність її зарядки. В залежності від доступної енергії вітру, стану заряду батареї і навантаження постійного струму адаптуються три режими зарядки. Режим зарядки з відстеженням максимальної точки потужності, режим зарядки постійного струму і режим заряд-

ки постійної напруги. Для забезпечення безперебійної експлуатації батареї, авторами розроблено новий алгоритм управління енергією батареї, для роботи в одному з трьох режимів, враховуючи погодні умови та зміну навантаження. Перевагою запропонованого методу є те, що немає необхідності в давачах стану батареї чи швидкості вітру. Вартість системи та необхідність індивідуального налаштування параметрів є суттєвим недоліком запропонованої системи.

Нова стратегія управління енергією та інтелектуального керування потужністю автономної системи виробництва електроенергії описана в [10]. До її складу входить вітрова турбіна з синхронним генератором з постійними магнітами, акумуляторна система і навантаження постійного струму. Відповідно до різних кліматичних змін, коливань навантаження та стану заряду батареї розглянута досліджується як комутована та невизначена нелінійна система. Основними завданнями є регулювання кількості енергії вітру, щоб реалізувати необхідну потужність та підтримка заряду батареї для продовження її циклу. Розроблено інтегральний контролер ковзного режиму та інтелектуальний метод керування для покращення надійності та стабільності автономної системи при сильних збуреннях. Запропонована система керування забезпечує швидшу перехідну характеристику та менші показники усталених помилок порівняно з іншими представленими методами. Однак є складною в реалізації та не враховує наявність додаткової підмагнічувальної обмотки.

Очевидно, що магнітоелектричні системи, що застосовуються у складі вітрогенеруючих систем, мають очевидні переваги. До них відносяться: відсутність втрат на збудження, відсутність контактної системи, в порівнянні з генераторами з електромагнітним збудженням. Крім того, відомі методи регулювання вихідними параметрами електрогенеруючої системи на базі вітроустановки із синхронним генератором не показують в повній мірі ефективність застосування додаткової підмагнічувальної обмотки. Виходячи з цього потрібно провести оцінку для роботи системи при використанні підмагнічувальної обмотки при максимально можливій потенційній енергії вітру.

3. Мета та задачі дослідження

Метою дослідження є розробка системи автоматичного керування максимальною потужністю автономної вітроустановки із синхронним магнітоелектричним генератором в умовах зміни швидкості вітру та навантаження. Це дасть можливість підвищити ефективність перетворення механічної енергії вітру в електричну.

Для досягнення мети були поставлені наступні задачі:

- розробити функціональну схему системи автоматичного керування максимальною потужністю автономної вітроустановки;
- синтезувати математичну модель синхронного магнітоелектричного генератора;
- синтезувати закони керування на основі методу зворотних задач динаміки у поєднанні з мінімізацією локальних функціоналів миттєвих значень енергій;

– провести дослідження якості регулювання системи автоматичного керування максимальною потужністю автономної вітроустановки в умовах зміни швидкості вітру та навантаження.

4. Матеріали та методи дослідження

Об'єктом дослідження є електромеханічні процеси в автономній вітроелектричній установці з магнітоелектричним генератором.

Для відбору максимальної потужності вітроелектричної установки з магнітоелектричним генератором необхідно керувати робочим магнітним потоком в залежності від зміни швидкості вітру та навантаження.

Механічні процеси протікають повільніше ніж електромагнітні процеси в генераторі. Електромеханічні сталі часу значно більші ніж електромагнітні.

Магнітоелектричні синхронні генератори – це електрогенератори, в яких для створення основного магнітного потоку використовуються постійні магніти. В роботі запропоновано конструкція магнітоелектричного генератора з гібридним збудженням. Додаткова обмотка (підмагнічувальна обмотка) може підсилювати або ослаблювати магнітний потік.

Дані генератори поєднують в собі переваги традиційних генераторів із електромагнітним збудженням та високу питому потужність, простоту і надійність генераторів із постійними магнітами. Розглядається діапазон потужностей синхронних магнітоелектричних генераторів для автономних вітроустановок в межах кіловати-десятки кіловат.

Швидкість вітру є непостійна, що обумовлює зміну швидкості обертання та механічної потужності вітряної турбіни. Графіки залежності вихідної потужності турбіни від швидкості вітру мають три області керування вітрогенератором, які показані на рис. 1. В роботі проведено дослідження автоматичного керування вітроустановкою під час роботи у другій зоні при змінній частоті обертання валу вітрової турбіни.

Для керування магнітним потоком синхронного генератора можуть бути використані синхронні генератори з гібридним збудженням. Система збудження складається з постійних магнітів на роторі та електричної обмотки збудження, що розташовується на нерухомому статорі [11]. Основний магнітний потік створюється постійними магнітами, а в середньому близько 20 % – обмоткою збудження. Керування магнітним потоком генератора здійснюється за рахунок зміни струму обмотки збудження. На особливу увагу заслуговують конструкції з аксіальним магнітним потоком [12], які забезпечують низькі синхронні швидкості обертання. Це дозволяє отримувати пряме (безредукторне) з'єднання вітроколеса та генератора. Така конструкція є перспективною для застосування в автономних вітроенергетичних системах, оскільки дозволяє розширити діапазон регулювання та підвищити ефективність перетворення енергії вітру в електричну енергію. Конструкція магнітоелектричного генератора із аксіальним магнітним потоком показано на рис. 2.

Синхронна електрична машина за своєю природою, як і інші типи машин змінного струму, є взаємозалежним нелінійним об'єктом керування, причому із впливом вихрових струмів. Керування синхронною машиною за таких умов вима-

гає компенсації негативного впливу цих координатних збурень. При визначенні за паспортними даними параметрів схеми заміщення синхронної машини виникають похибки, зумовлені припущеннями методики обчислень. У процесі роботи машини електричні опори обмоток змінюються внаслідок нагрівання. Внаслідок цих параметричних обурень розрахункові значення параметрів відрізняються від реальних, що призводить до погіршення заданої якості керування.

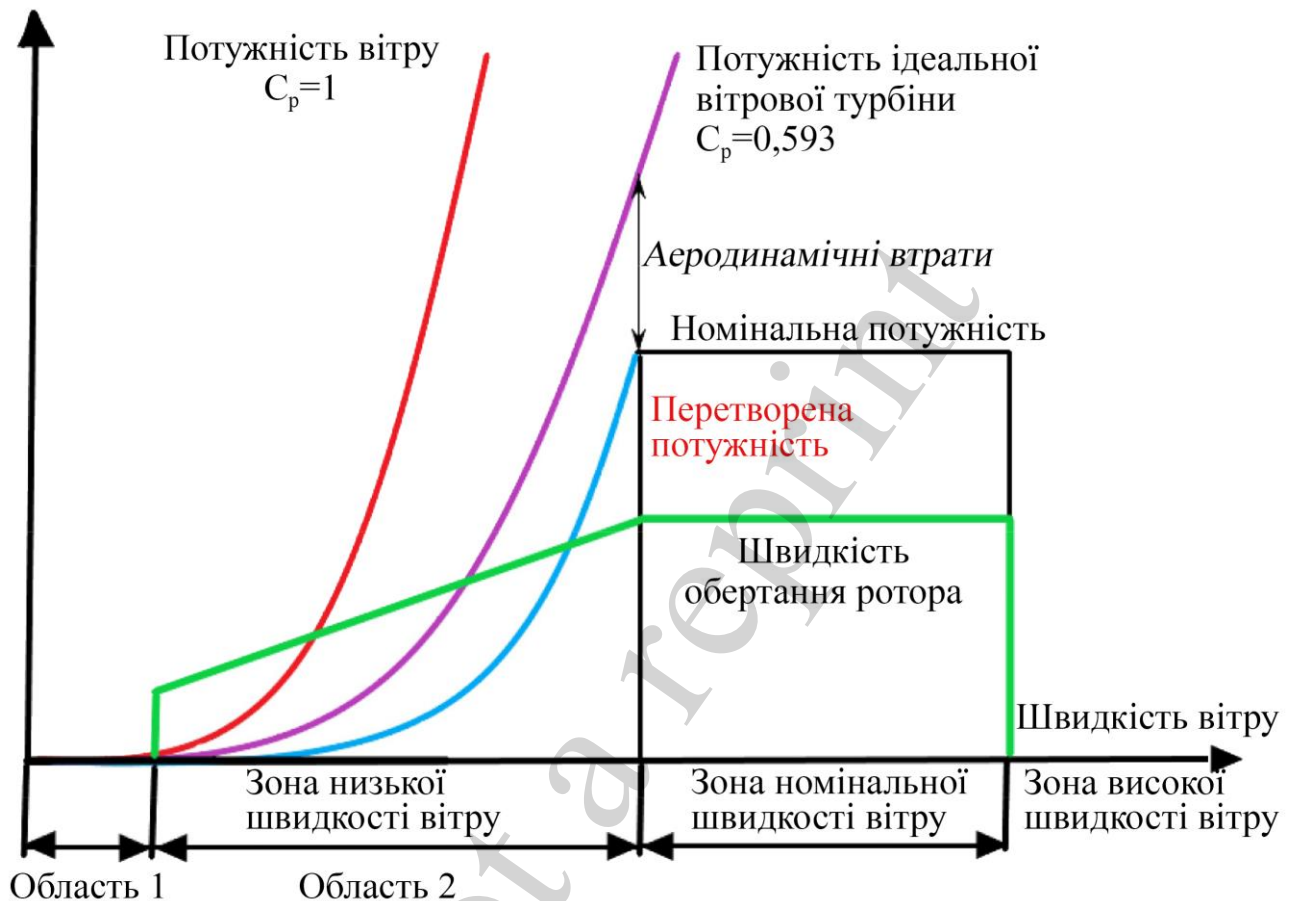


Рис. 1. Вихідна потужність турбіни в залежності від швидкості вітру

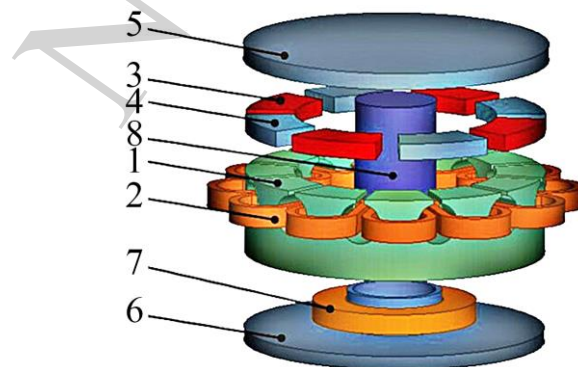


Рис. 2. Синхронний генератор з осевим магнітним потоком: 1 – магнітне осердя статора, виконане із рулонної електротехнічної сталі; 2 – мідна одношарова трифазна обмотка статора; 3 – постійні магніти; 4 – полюсні сердечники, форма та розмір яких ідентичні постійним магнітам; 5 – індуктор ротора, що забезпечує протікання магнітного потоку; 6 – феромагнітна маточина; 7 – обмотка збудження; 8 – вал генератора [13]

Даний тип синхронного магнітоелектричного генератора взято за основу для дослідження у даній роботі.

Вирішити задачу синтезу законів керування координатами синхронного генератора в умовах параметричних та координатних збурень можна декількома методами теорії автоматичного керування:

1. Релейні методи керування зі змінною структурою забезпечують роботу регуляторів у релейному режимі. Ця особливість обумовлює появу характерних ковзних режимів роботи. Ковзні режими збільшують споживання енергії на керування і призводять до підвищеного зносу механізмів, зменшують завадостійкість системи і можуть призводити до нестійкої роботи внаслідок неврахованої динаміки. Для зменшення цих недоліків релейні елементи замінюються на лінійні ланки з насиченням, у результаті чого отримуються згладжені методи зі змінною структурою. Системи на їх основі за динамічними характеристиками близькі до релейних, проте розвивають обмежені керуючі впливи, що погіршує точність керування та робастність.

2. Методи керування з великим коефіцієнтом посилення розімкнутої системи мають підвищену точність та робастну стійкість по відношенню до невизначеності параметрів та зовнішніх низькочастотних впливів. Однак при великих коефіцієнтах можлива поява нестійкості високочастотної неврахованої динаміки, а також поява похибок через високочастотну перешкоду.

3. Комбіновані методи керування із спостерігачами невизначеності дозволяють для нелінійного нестационарного об'єкта синтезувати лінійний стаціонарний регулятор, який забезпечує задані показники якості керування. У цьому методі завдання компенсації зовнішніх впливів і забезпечення заданих показників якості перехідних процесів вирішуються незалежно, що спрощує синтез. Недоліком методу є складні умови забезпечення працездатності спостерігача невизначеності.

4. Адаптивні методи керування з ідентифікацією параметрів у реальному часі переважно призначені для лінійних систем. Їхні можливості обмежуються зі збільшенням кількості параметрів через необхідність виконання умов їх ідентифікації, що визначаються характером руху. Це веде до підвищення вимог до характеру руху системи, що може не відповідати технологічному процесу. У адаптивних методах керування з еталонною моделлю визначається модель бажаного руху у вигляді рівнянь з початковими умовами, найбільш близькими до початкових умов об'єкта керування. Оскільки система керування повинна відстежувати задану траєкторію, то рівняння руху представляються у вигляді двох складових: рівнянь еталонної моделі та рівнянь руху за цією моделлю. Для складних об'єктів рівняння руху будуть нелійними та нестационарними. Ця обставина ускладнює як синтез алгоритмів керування так і дослідження стійкості траєкторії.

5. В основу методу зворотних задач динаміки у поєднанні з мінімізацією локальних функціоналів миттєвих значень енергій покладено ідею оборотності прямого методу Ляпунова щодо дослідження стійкості. Метод дозволяє знаходити закон керування, у якому замкнений контур має заздалегідь задану функцію Ляпунова. Це надає системі властивість стійкості в цілому, що дозволяє ви-

рішувати завдання керування взаємозалежними об'єктами за математичними моделями локальних контурів. Характерною особливістю оптимізації є знаходження не абсолютного мінімуму функціоналу якості, як у класичних системах, а деякого мінімального значення, що забезпечує допустиму за технічними умовами динамічну похибку системи. Отримані закони керування забезпечують слабку чутливість до параметричних збурень, здійснюють динамічну декомпозицію взаємопов'язаної системи і не містять диференціюючих ланок, що забезпечує їх практичну реалізацію. Зазначені переваги методу зумовлюють його застосування у цій роботі.

Розробка системи автоматичного керування максимальною потужністю автономної вітроустановки із синхронним магнітоелектричним генератором (СМЕГ) розглянуто на прикладі експериментального зразка синхронного генератора з аксіальним магнітним потоком, спроектованого авторами. Загальний вигляд експериментального СМЕГ показано на рис. 3.

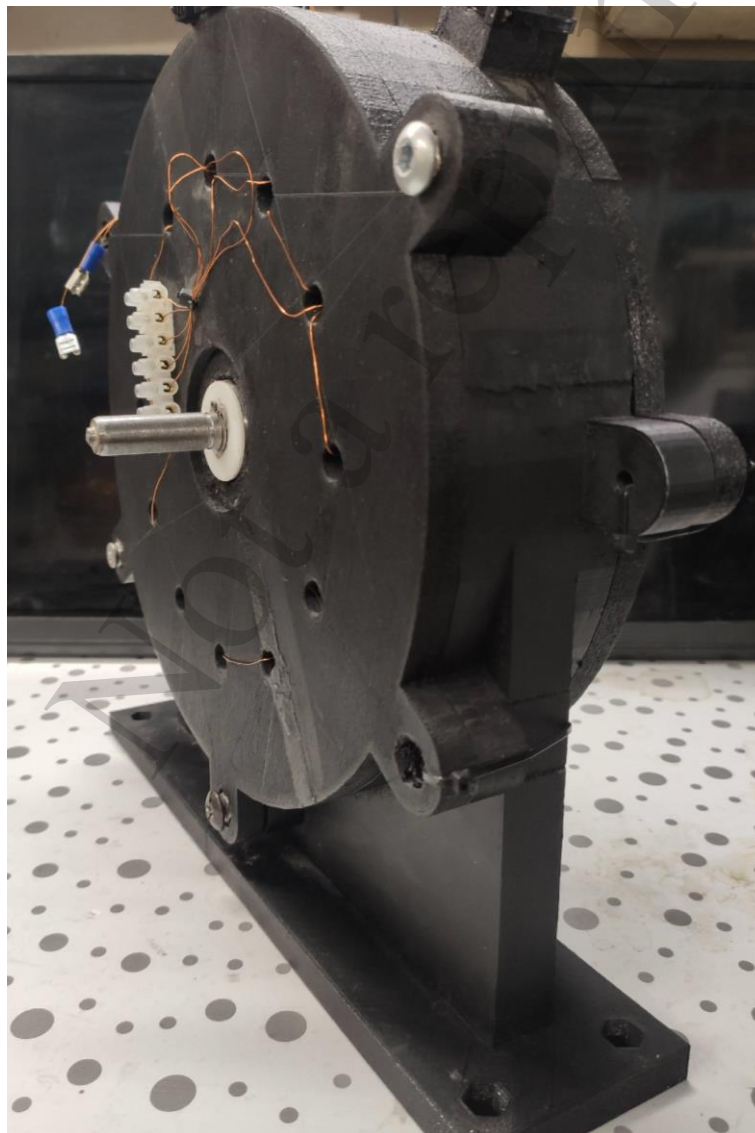


Рис. 3. Загальний вигляд експериментального генератора

Основні параметри експериментального СМЕГ представлені у табл. 1.

Таблиця 1

Параметри експериментального СМЕГ

№	Параметр	Значення
1	Повна номінальна потужність, ВА	86,0
2	Номінальна фазна напруга, В	24,0
3	Номінальний фазний струм, А	1,2
4	Кількість пар полюсів	4
5	Номінальний фазний опір обмотки статора, Ом	8,8
6	Індуктивність фази обмотки статора, Н	0,022
7	Опір додаткової обмотки, Ом	8
8	Індуктивність додаткової обмотки, Н	0,017
9	Номінальна напруга додаткової обмотки, В	8
10	Номінальний струм додаткової обмотки, А	1
11	Магнітний потік постійних магнітів, Wb	0,16

Для експериментального СМЕГ розраховані залежності механічної потужності від швидкості обертання ротора вітрової турбіни при зміні швидкості вітру від 3 до 8 м/с. Результати розрахунку представлені на рис. 4. Як видно на рис. 4, при будь-якому значенні швидкості обертання на характеристиках є точки екстремуму, які формують криву максимальної вихідної потужності вітрової турбіни P_{\max} .

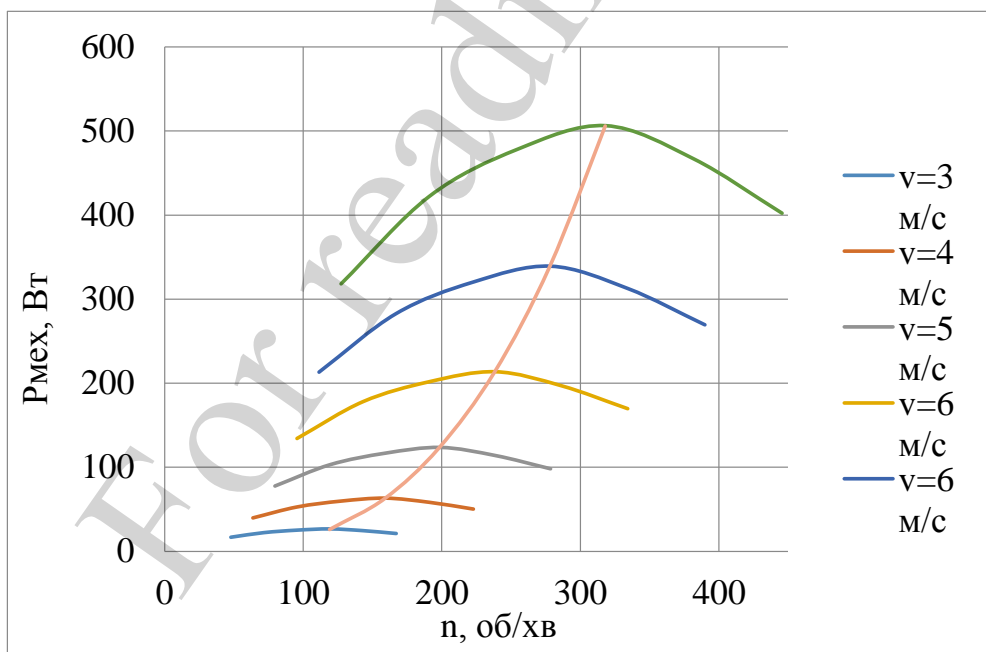


Рис. 4. Залежність механічної потужності від швидкості обертання вітрової турбіни для експериментального генератора

Крива P_{\max} (рис. 4) відображає максимум механічної та електричної потужності, що розвиває вітроустановка при зміні швидкості вітру. Для максимально ефективного перетворення механічної енергії вітру в електричну завданням системи керування є робота генератора згідно з даною кривою.

5. Результати досліджень системи керування потужністю автономної вітрової установки із синхронним магнітоелектричним генератором

5. 1. Розробка функціональної схеми системи автоматичного керування максимальною потужністю автономної вітроустановки

Система автоматичного керування має каскадну структуру. Вона складається з внутрішнього контуру регулювання струму збудження i_f та зовнішнього контуру регулювання максимальної електричної потужності генератора P . У процесі керування СМЕГ навантажує вітрову турбіну моментом T , забезпечуючи роботу в точці екстремуму на механічній характеристиці згідно з рис. 4.

Функціональна схема системи керування представлена на рис. 5.

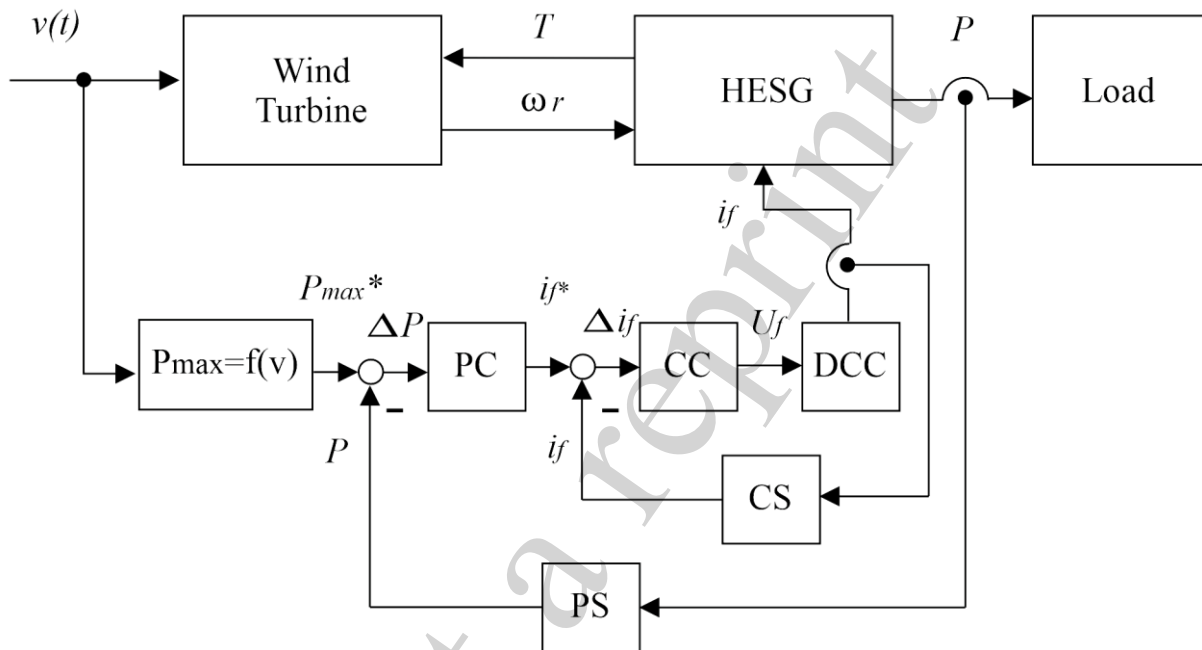


Рис. 5. Функціональна схема системи керування максимальною потужністю вітрової турбіни: PC – контролер потужності генератора; CC – контролер струму збудження генератора; DCC – перетворювач постійного струму; CS – давач струму додаткової обмотки збудження; PS – давач потужності; P_{max}^* , P – еталонне та вимірне значення активної потужності; i_f^* , i_f – еталонне та вимірне значення струму додаткової обмотки

Завданням системи автоматичного керування є відбір максимальної потужності вітрової турбіни за певної швидкості вітру. Реалізація системи досягається за рахунок регулювання струму збудження СМЕГ.

5. 2. Розробка математичної моделі синхронного магнітоелектричного генератора з гібридним збудженням

Математична модель СМЕГ у системі координат (dq) , орієнтованої по магнітній осі ротора, описується нелінійною системою рівнянь (1) [13]:

$$\begin{cases}
\frac{di_d}{dt} = \frac{1}{L_s} \left[u_d - R_s i_d + \omega L_s i_q - L_m \frac{di_f}{dt} \right]; \\
\frac{di_q}{dt} = \frac{1}{L_s} \left[u_q - R_s i_q - \omega L_s i_d - \omega L_m i_f - \omega \psi_0 \right]; \\
\frac{di_f}{dt} = \frac{1}{L_f} \left[u_f - R_f i_f - L_m \frac{di_d}{dt} \right]; \\
\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J} [T_{WT} - T]; \\
T = \frac{3}{2} Z_p [\psi_0 i_q \pm L_m i_q i_f],
\end{cases} \quad (1)$$

де i_d, i_q та u_d, u_q – струми та напруги статора по d - та q -осям; i_f та u_f – струм та напруга додаткової обмотки; $\omega = Z_p \cdot \omega_r$, та ω_r – електрична та кутова швидкість ротора; Z_p – кількість пар полюсів; J – момент інерції; T, T_{WT} – електромагнітний момент та механічний момент турбіни; ψ_0 – магнітний потік постійних магнітів; L_s, L_f, L_m – індуктивність обмотки статора, додаткової обмотки та взаємодіючої індуктивності; R_s, R_f – активний опір обмоток статора та додаткової.

Для вирішення завдання керування вихідна система рівнянь (1) перетворюється до вигляду (2) методом декомпозиції. Координатні обурення F_1, F_2, F_3 трактуються як невизначені, але обмежені за величиною $F_1 \leq F_1^0, F_2 \leq F_2^0, F_3 \leq F_3^0$. Рівня керуючих напруг достатньо для їх компенсації $u_d > F_1^0, u_q > F_2^0, u_f > F_3^0$.

Таким чином, взаємопов'язана нелінійна система 4-го порядку перетворюється на систему з 4-х лінійних рівнянь першого порядку. В результаті завдання керування об'єктом (1) зводиться до вирішення чотирьох локальних завдань керування лінійними підсистемами (2).

$$\begin{cases}
L_s \frac{di_d}{dt} + R_s i_d = u_d + F_1; \\
L_s \frac{di_q}{dt} + R_s i_q = u_q + F_2; \\
L_f \frac{di_f}{dt} + R_f i_f = u_f + F_3; \\
J \frac{d\omega_r}{dt} = [T_{WT} - T]; \\
T = \frac{3}{2} Z_p [\psi_0 i_q \pm L_m i_q i_f]; \\
F_1 = \omega L_s i_q - L_m \frac{di_f}{dt}; \\
F_2 = -\omega L_s i_d - \omega L_m i_f - \omega \psi_0; \\
F_3 = -L_m \frac{di_d}{dt}.
\end{cases} \quad (2)$$

Таким чином, математична модель СМЕГ реалізується шляхом модифікації стандартних блоків диференційними рівняннями (2) в програмному забезпеченні Matlab-Simulink.

5.3. Закони керування на основі методу зворотних задач динаміки

Бажана якість замкнутого контуру керування згідно з концепцією зворотних задач динаміки задається диференціальним рівнянням наступного виду

$$\frac{d^n z}{dt^n} + \dots + \gamma_i \frac{d^i z}{dt^i} + \dots + \gamma_0 z = \beta_m \frac{d^m x^*}{dt^m} + \dots + \beta_j \frac{d^j x^*}{dt^j} + \dots + \beta_0 x^*. \quad (3)$$

За допомогою коефіцієнтів рівняння γ_i та β_j задається бажаний характер та тривалість перехідного процесу вихідної координати z під час руху заданою траєкторією x^* , де x^* – диференційована за часом необхідну кількість разів функція; $m < n$. Бажана передавальна функція замкнутого контуру керування, отримана на підставі рівняння (3) для випадку $n=3$ та $m=1$, має вигляд (де $p=d/dt$ – оператор Лапласа)

$$W_s(p) = \frac{z(p)}{x^*(p)} = \frac{\beta_1 p + \beta_0}{p^3 + \gamma_2 p^2 + \gamma_1 p + \gamma_0}. \quad (4)$$

Відповідна їй передавальна функція розімкнутого контуру керування дорівнює

$$W_r(p) = \frac{W_s(p)}{1 - W_s(p)} = \frac{\beta_1 p + \beta_0}{p^3 + \gamma_2 p^2 + (\gamma_1 - \beta_1) p + (\gamma_0 - \beta_0)}. \quad (5)$$

З рівняння (5) слідує, що для отримання системи керування з астатизмом першого порядку $\nu=1$ необхідно задати значення коефіцієнтів $\beta_0=\gamma_0$ тоді

$$W_r(p) = \frac{\beta_1 p + \gamma_0}{p [p^2 + \gamma_2 p + (\gamma_1 - \beta_1)]}, \quad (6)$$

а з астатизмом другого порядку $\nu=2$ потрібно встановити $\beta_0=\gamma_0$ і $\beta_1=\gamma_1$

$$W_r(p) = \frac{\gamma_1 p + \gamma_0}{p^2 (p + \gamma_2)}. \quad (7)$$

Задана добротність за швидкістю системи (6) визначається виразом $D_\omega^z = \gamma_0 / (\gamma_1 - \beta_1)$, а добротність прискорення системи (7) дорівнює $D_\varepsilon^z = \gamma_0 / \gamma_2$. Порядок n рівняння (3) і передавальна функція (4) можуть бути різними для

кожного замкнутого контуру керування відповідно до вимог якості керування і зазвичай дорівнює або на одиницю вище порядку об'єкта керування.

Структура та параметри рівняння бажаної якості керування (3) задаються такими, щоб обурений рух був асимптотично стійким. Згідно з критерієм стійкості Гурвіца для рівняння третього порядку, ця умова виконується при співвідношеннях параметрів $\gamma_0 > 0$; $\gamma_1 > 0$; $\gamma_2 > 0$ і $\gamma_1\gamma_2 > \gamma_0$. Для рівнянь другого і першого порядку – при додатних значеннях коефіцієнтів.

Зв'язок між коефіцієнтами рівняння (3) і необхідними показниками якості керування, такими як час регулювання, вид перехідного процесу, перерегулювання легко встановлюється за допомогою відомих методів теорії автоматичного керування. Це такі методи, як кореневі, частотні або метод стандартних поліномів, з уточненням шляхом моделювання.

Розробка закону керування струмом збудження i_f СМЕГ здійснюється на підставі третього рівняння системи (2). Як видно, локальний об'єкт керування описується рівнянням першого порядку, тому порядок бажаного рівняння замкнутого контуру струму виду (3) також приймається рівним одиниці ($n=1$; $m=0$) із забезпеченням астатизму першого порядку $\nu=1$ і заданою добротністю за швидкістю $D_\omega^z = \gamma_{0f}$

$$\dot{z} + \gamma_{0f} z = \gamma_{0f} i_f^* \quad (8)$$

Тривалість монотонного перехідного процесу струму $t_r \approx 3/\gamma_{0f}$ задається за допомогою величини єдиного коефіцієнта γ_{0f} .

Потрібно знайти таку керуючу функцію регулятора струму збудження u_f , щоб якість керування струмом наближалася до бажаного, заданого рівнянням (8). Ступінь наближення реального процесу керування струмом до бажаного оцінюється функціоналом, який характеризує нормовану за індуктивністю енергію першої похідної магнітного поля виду $W_m = L \cdot (i^2/2)$.

$$G(u_f) = \frac{1}{2} \left[\dot{z}(t) - \dot{i}_f(t, u_f) \right]^2 \quad (9)$$

Знаходження керуючої функції $u_f = u_f(i_f)$ класичними методами теорії автоматичного керування за умов досягнення абсолютного мінімуму функціоналу призводить до традиційного закону керування компенсаційного типу, для реалізації якого потрібна точна інформація про структуру та параметри об'єкта

$$\min_u G(u_f) = 0 \quad (10)$$

Відхилення параметрів від розрахункових значень призводить до погіршення якості керування.

Цей недолік усувається, якщо відмовитися від точного виконання умови (10), а лише обмежитися вимогою, щоб значення функціоналу (9) належало де-

якому околиці екстремального мінімуму. Це забезпечує допустиму за технічними умовами динамічну помилку $|z(t) - i_f(t)| \leq \varepsilon$. Для цього мінімізація функціоналу здійснюється за градієнтним законом першого порядку

$$\frac{du_f(t)}{dt} = -\lambda_f \frac{dG(u_f)}{du_f}, \quad (11)$$

де $u_f > 0$ – константа.

З урахуванням (2) та (8) похідна функціонала дорівнює

$$\frac{dG(u_f)}{du_f} = -\frac{1}{L_f} (\dot{z} - \dot{i}_f). \quad (12)$$

Після підстановки (11), (12) знаходиться закон керування струмом збудження

$$\dot{u}_f(t) = k_f (\dot{z} - \dot{i}_f), \quad (13)$$

де $k_f = \lambda_f / L_f = \text{const}$ – коефіцієнт посилення регулятора струму збудження.

Необхідна умова збіжності процесу мінімізації функціоналу за $t \rightarrow \infty$ має вигляд

$$\frac{dG(u_f)}{dt} < 0; \quad (14)$$

$$G(u_f) \rightarrow 0.$$

Ця умова виконується згідно з правилом знаків

$$\text{sign}(k_f) = \text{sign}(1 / L_f). \quad (15)$$

Змінна z в законі керування (13) є необхідною (заданою) похідною струму i збудження. Вона визначається в реальному часі з рівняння бажаної якості (8) шляхом замикання системи керування зворотним зв'язком по струму збудження $z = i_f$

$$\dot{z} = \gamma_{0f} (i_f^* - i_f). \quad (16)$$

Остаточно закон керування струмом порушення набуває вигляду після інтегрування обох частин рівняння (13) з урахуванням (16)

$$u_f(t) = k_f(z - i_f); \quad (17)$$

$$z = \gamma_{0f} \int (i_f^* - i_f) dt.$$

На підставі (17) побудована структурна схема регулятора струму збудження (СС) типу 101 ($n=1; m=0; v=1$), показана на рис. 6.

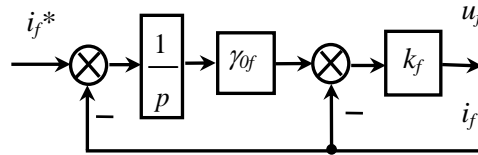


Рис. 6. Структура регулятора струму збудження генератора

По рис. 6 видно, що регулятор має нетипову структуру і не містить параметрів об'єкта керування (2), що притаманно для класичних регуляторів. Регулятор містить тільки параметр γ_{0f} бажаного закону керування (8), за допомогою якого задається необхідний час монотонного перехідного процесу.

Важливим завданням синтезу є вивчення стійкості отриманої системи керування. Рівняння замкнутого контуру струму збудження, отримане після підстановки до третього рівняння об'єкта (2) закону керування (13), з урахуванням (16) має вигляд

$$\ddot{i}_f + (R_f / L_f + k_f / L_f) \dot{i}_f + (k_f \gamma_{0f} / L_f) i_f = (k_f \gamma_{0f} / L_f) i_f^*. \quad (18)$$

Аналіз показує, що замкнута система (18) є стійкою навіть при необмеженому збільшенні коефіцієнта посилення регулятора струму $k_f \rightarrow \infty$, оскільки згідно з критерієм стійкості Гурвіца коефіцієнти рівняння є позитивними

$$(R_f / L_f + k_f / L_f) > 0; (k_f \gamma_{0f} / L_f) > 0. \quad (19)$$

Зі збільшенням коефіцієнта посилення регулятора динамічні процеси в реальному контурі струму збудження наближаються до бажаного, заданого рівнянням (8). Це очевидно після поділу всіх членів рівняння (18) на складову k_f/L_f при $k_f \rightarrow \infty$

$$\frac{L_f}{k_f} \ddot{i}_f + \left[\frac{R_f}{k_f} + 1 \right] \dot{i}_f + \gamma_{0f} i_f = \gamma_{0f} i_f^*. \quad (20)$$

У контурі керування струмом збудження знаходиться мала постійна часу T_μ силового перетворювача ДСС, яка не враховувалася під час синтезу закону керування. Оцінка впливу цієї неврахованої інерційності на динамічні власти-

вості контуру струму збудження здійснюється за допомогою рівняння замкнутої системи, отриманого аналогічно (18)

$$\begin{aligned} T_{\mu} \ddot{i}_f + (1 + T_{\mu} R_f / L_f) \dot{i}_f + (R_f / L_f + k_f / L_f) i_f + (k_f \gamma_{0f} / L_f) i_f = \\ = (k_f \gamma_{0f} / L_f) i_f^*. \end{aligned} \quad (21)$$

Згідно з критерієм Гурвіца для стійкості контуру струму, що описується рівнянням (21), потрібно виконання наступної умови

$$(1 + T_{\mu} R_f / L_f) (T_{\mu} R_f / L_f + k_f / L_f) > T_{\mu} k_f \gamma_{0f} / L_f, \quad (22)$$

яка перетворюється на наступну нерівність у результаті граничного переходу

$$\gamma_{0f} < 1 / T_{\mu} + R_f / L_f. \quad (23)$$

Таким чином, наявність у контурі керування струмом збудження малої постійної пори T_{μ} обмежує максимально допустиму бажану швидкодію контуру струму, що задається коефіцієнтом γ_{0f} .

Важливим питанням є визначення властивостей контуру струму збудження при кінцевих значеннях коефіцієнта посилення регулятора k_f . Передавальна функція розімкнутого контуру струму, що отримана на підставі (18) аналогічно (5), має вигляд

$$W_r(p) = \frac{k_f \gamma_{0f} / L_f}{p \left[p + (R_f / L_f + k_f / L_f) \right]}. \quad (24)$$

Згідно (24) струмовий контур має заданий астатизм першого порядку $\nu=1$ і добротність за швидкістю рівну

$$D_{\omega} = \frac{k_f \gamma_{0f} / L_f}{R_f / L_f + k_f / L_f} = \frac{\gamma_{0f}}{R_f / k_f + 1}. \quad (25)$$

Умовою забезпечення допустимої динамічної помилки струму є співвимірна задана і реальна добротність $D_{\omega}^z = D_{\omega}$, що виконується згідно з (25) за великого коефіцієнта посилення регулятора k_f .

Цей недолік виключається, якщо синтезувати закон керування на підставі рівняння бажаної якості, порядок якого дорівнює $n=2$. На відміну від (8), він на одиницю вище за порядок рівняння локального об'єкта керування – третє рівняння системи (2):

$$\ddot{z} + \gamma_{1f} \dot{z} + \gamma_{0f} z = \gamma_{0f} i_f^*. \quad (26)$$

Застосовуюючи вищевикладену методику, виходить наступний закон керування струмом збудження

$$u_f(t) = k_f(z - i_f); \quad (27)$$

$$z = \int f_0 dt;$$

$$f_0 = \gamma_{0f} \int (i_f^* - i_f) dt - \gamma_{1f} i_f.$$

За рівнянням (27) побудовано структурну схему регулятора струму збудження (СС) типу 201, представлену на рис. 7. Регулятор також не містить параметрів об'єкта керування, що притаманно для класичних законів.

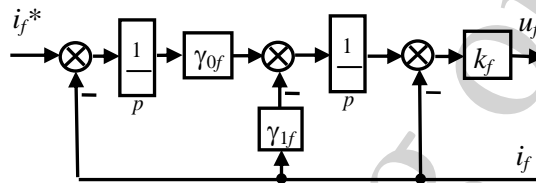


Рис. 7. Структура регулятора струму збудження генератора

Передавальна функція розімкнутого контуру струму для цього закону керування має вигляд

$$W_r(p) = \frac{k_f \gamma_{0f} / L_f}{p \left[p^2 + (R_f / L_f + k_f / L_f) p + k_f \gamma_{1f} / L_f \right]}. \quad (28)$$

Згідно (28) струмовий контур має заданий астатизм першого порядку $\nu=1$ і добротність за швидкістю, що дорівнює заданій

$$D_\omega = D_\omega^z = \frac{\gamma_{0f}}{\gamma_{1f}}. \quad (29)$$

Це забезпечує допустиму динамічну похибку струму за помірних коефіцієнтів посилення регулятора k_f .

Розробка закону керування максимальною потужністю P СМЕГ здійснюється на підставі бажаного рівняння замкнутого контуру першого порядку ($n=1; m=0$) із забезпеченням астатизму першого порядку $\nu=1$ і заданою добротністю за швидкістю $D_\omega^z = \gamma_{0p}$

$$\dot{z} + \gamma_{0p} z = \gamma_{0p} P_{\max}^* \quad (30)$$

Тривалість монотонного перехідного процесу потужності $t_r \approx 3/\gamma_{0p}$ задається за допомогою величини коефіцієнта γ_{0p} . Після проведення синтезу закону керування, проведеного аналогічно до вищевикладеного синтезу струму збудження, виходить наступне рівняння регулятора потужності

$$i_f^*(t) = k_p (z - P); \quad (31)$$

$$z = \gamma_{0p} \int (P_{\max}^* - P) dt.$$

На підставі (31) побудовано структурну схему регулятора максимальної потужності (РС) типу 101, показану на рис. 8.

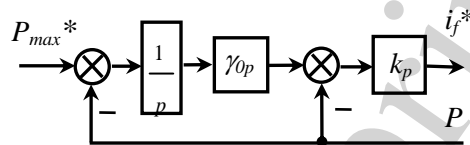


Рис. 8. Структура регулятора максимальної потужності генератора

Регулятор потужності має нетипову структуру і не містить параметрів об'єкта керування (2), що характерно для класичних регуляторів. Регулятор містить тільки параметр γ_{0p} бажаного закону керування (30), за допомогою якого задається необхідний час монотонного перехідного процесу.

5. 4. Дослідження якості регулювання системи автоматичного керування максимальною потужністю автономної вітроустановки

Дослідження якості керування розробленої системи проведено шляхом моделювання в середовищі Matlab/Simulink з параметрами експериментального СМЕГ, представленими в табл. 1. Регулятори струму збудження та максимальної потужності мають наступні значення параметрів: $\gamma_{0f}=1000$; $k_f=1000$; $\gamma_{0p}=500$; $k_p=0.1$.

У процесі моделювання швидкість вітру змінювалася від 3 до 8 м/с, як показано на рис. 9.

Система керування розраховує максимальну вихідну потужність ротора вітроагрегату в залежності від швидкості вітру (рис. 9), яка є сигналом завдання для контуру керування вихідною потужністю електрогенератора.

Завдяки роботі регуляторів струму збудження та потужності СМЕГ видає максимальну електричну потужність на навантаження (крива повторює вид, як показано на рис. 10).

Графіки струму та напруги додаткової обмотки збудження у процесі керування показані на рис. 11.

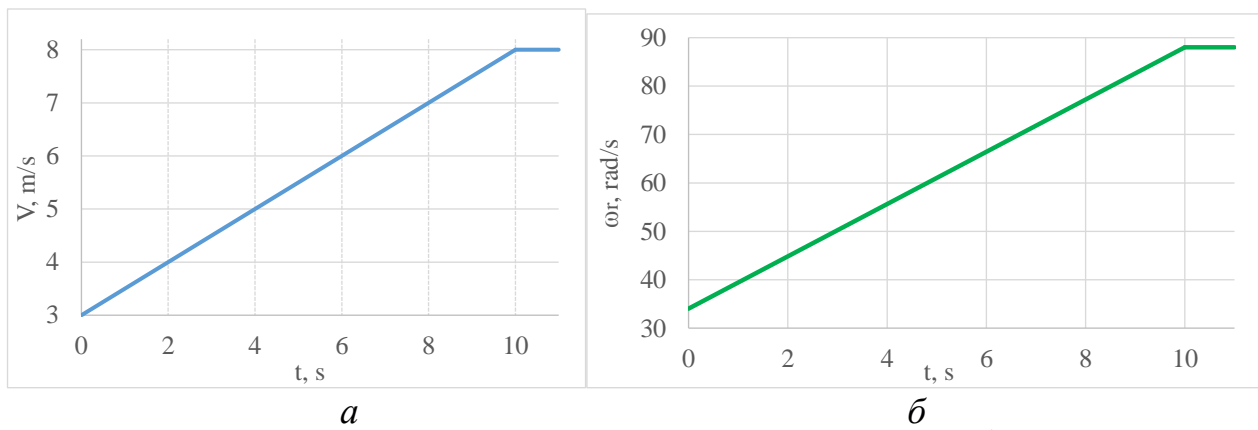


Рис. 9. Характери зміни вітру та швидкості обертання: *a* – графік зміни швидкості вітру; *б* – графік зміни швидкості синхронного магнітоелектричного генератора

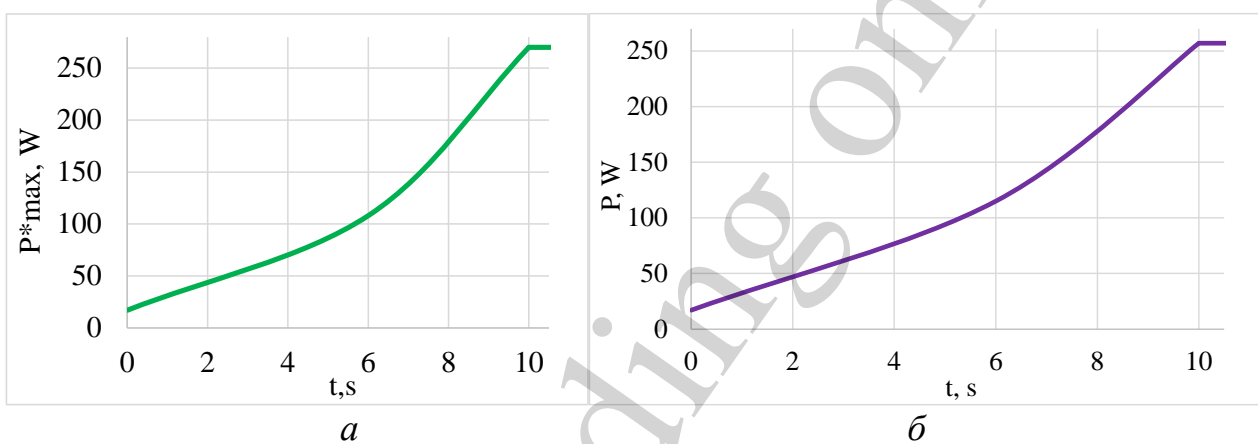


Рис. 10. Характер зміни потужності: *a* – графік максимальної потужності ротора вітроагрегату; *б* – графік електричної потужності генератора

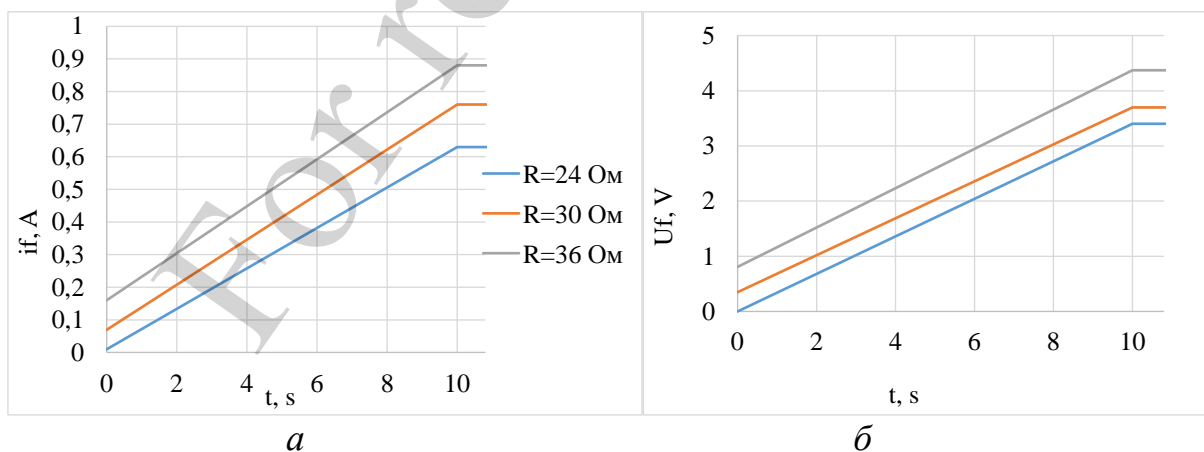


Рис. 11. Електричні параметри додаткової обмотки: *a* – струм додаткової обмотки; *б* – напруга додаткової обмотки

Графіки струму та напруги статора СМЕГ при зміні швидкості вітру та навантаження показані на рис. 12.

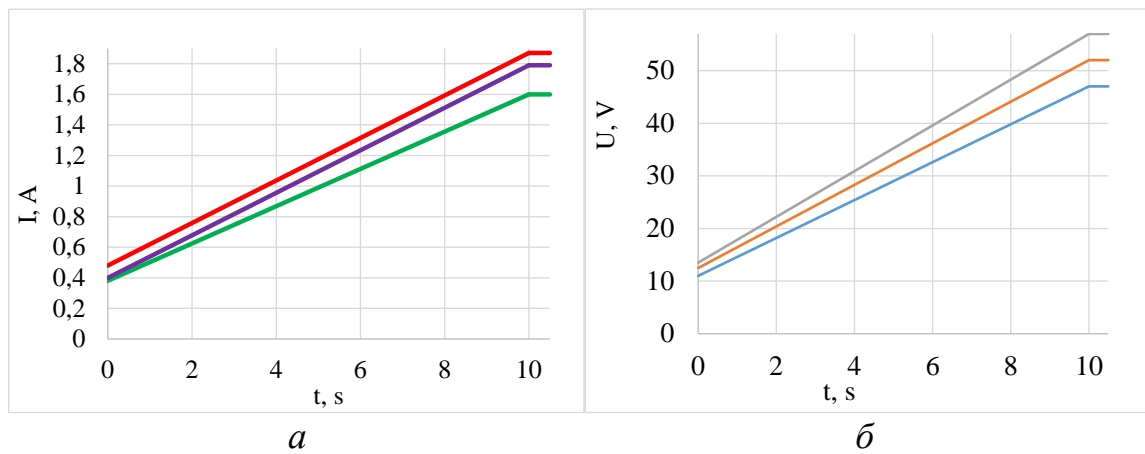


Рис. 12. Електричні параметри обмотки якоря генератора: *a* – струм статора генератора; *б* – напруга статора генератора

Важливим питанням є дослідження якості перехідних процесів при шквалістому вітрі та раптовій зміні навантаження. На рис. 13 представлений графік струму збудження, а на рис. 14 графік максимальної потужності при збільшенні стрибком швидкості вітру з 3 до 8 м/с.

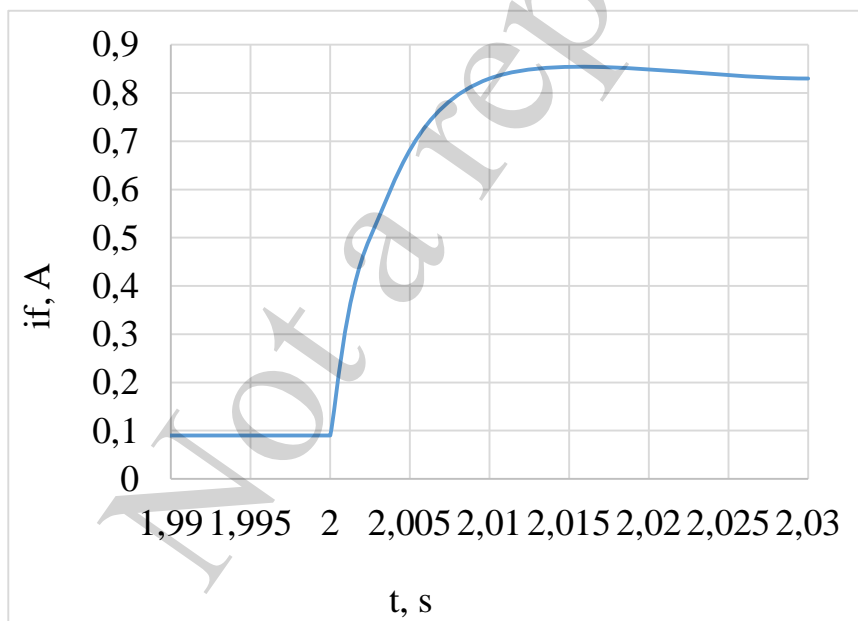


Рис. 13. Графік перехідного процесу струму збудження при зміні вітру

На рис. 15 представлений графік струму збудження та графік максимальної потужності при зміні стрибком електричного опору навантаження генератора.

Після перехідного процесу струм та потужність стабілізуються і залишаються незмінними, це свідчить про стабільність системи керування.

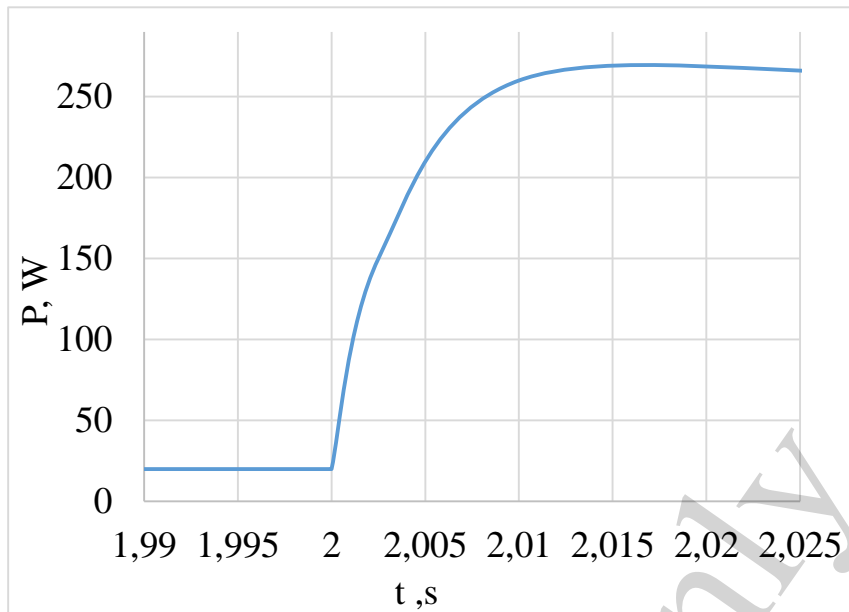


Рис. 14. Графік перехідного процесу максимальної потужності при зміні вітру

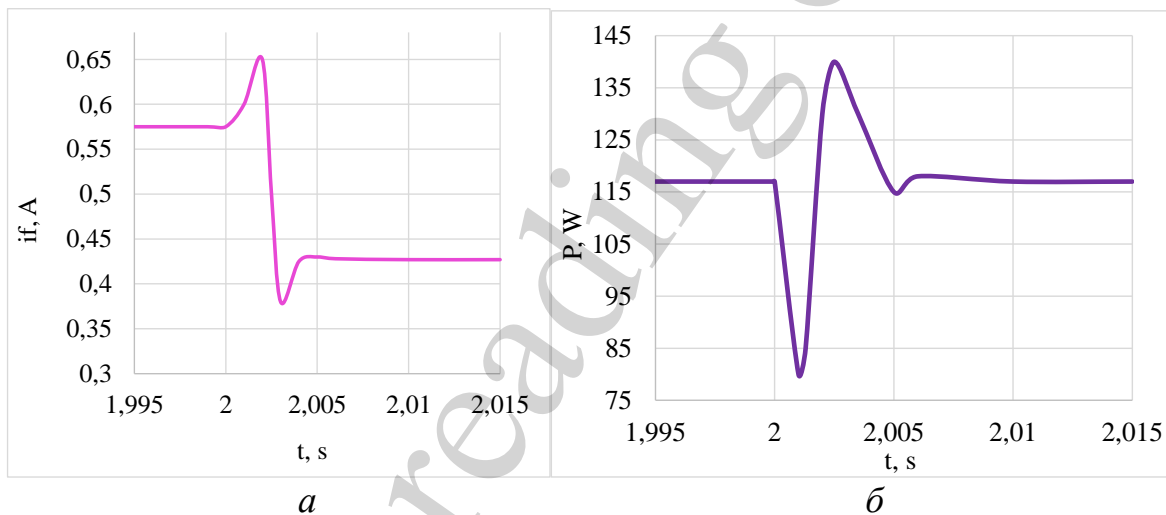


Рис. 15. Характер перехідних процесів в системі: *a* – графік перехідного процесу струму збудження; *б* – максимальної потужності при зміні навантаження

6. Обговорення результатів керування максимальною потужністю автономної вітрової установки із синхронним магнітоелектричним генератором

Розроблена функціональна схема системи автоматичного керування максимальною потужністю автономної вітроустановки (рис. 5) у складі з СМЕГ з аксіальним магнітним потоком. Система змінює струм додаткової обмотки генератора таким чином, щоб працювати на максимумах вихідної механічної потужності вітрової турбіни (рис. 4) при зміні швидкості вітру. Опорними даними є швидкість обертання ротора вітроагрегату та максимальні значення потужності.

При зміні швидкості вітру від 3 до 8 м/с (рис. 9, *a*) кутова швидкість ротора СМЕГ змінюється від 34 до 86 рад/с відповідно (рис. 9, *б*). Згідно із цими даними система керування (рис. 5) розраховує максимальну вихідну потуж-

ність ротора вітроагрегату в залежності від швидкості вітру (рис. 4, 9). Швидкість вітру є сигналом завдання для контуру корекції вихідною потужністю синхронного генератора. При роботі регуляторів струму збудження (рис. 7) та потужності (рис. 8), генератор видає максимальну електричну потужність на навантаження (рис. 10, б). За умови зміни швидкості вітру електрогенератор віддає на навантаження активну потужність від ≈ 20 Вт до 270 Вт при швидкості вітру 8 м/с. Це дозволяє підвищити ефективність перетворення механічної енергії вітру в електричну на 15–40 % [11, 13].

Згідно із результатами, показаними на рис. 11, а, б, струм та напругу збудження генератора необхідно збільшувати зі збільшенням швидкості вітру і зменшувати зі збільшенням навантаження: $R_{load}=36$ Ом; 30 Ом; 24 Ом. У першому випадку це пояснюється значним ростом механічної потужності ротора вітрової турбіни, а отже і необхідністю збільшувати магнітний потік генератора для генерації максимальної потужності. В другому випадку це пов'язано із аеродинамічними параметрами та характеристиками ротора вітроагрегату та параметрами навантаження.

При зміні швидкості вітру від 3 до 8 м/с струм статора генератора збільшується з 0,38 до 1,6 при навантаженні 36 Ом і з 0,46 до 1,98 А при 24 Ом (рис. 12, а). Одночасно напруга статора генератора збільшується з 13,5 до 58,0 при навантаженні 36 Ом і з 11 до 47 В при 24 Ом (рис. 12, б). Отримані результати на рис. 11, 12 мають місце при регулюванні максимальною потужністю СМЕГ.

Графіки струму збудження (рис. 13) та максимальної потужності (рис. 14) характеризуються монотонними (без перерегулювання) перехідними процесами за час, що визначається параметрами регуляторів γ_{of} і γ_{op} (3)–(30).

Графік струму збудження та графік максимальної потужності при зміні стрибком електричного опору навантаження з 36 до 24 Ом за швидкості вітру 6 м/с (рис. 15) характеризує стійкість розробленої системи в динамічному режимі. Після перехідного процесу максимальна потужність набуває попереднього значення 117 Вт, а струм збудження зменшується з 0,58 до 0,43 А.

Існуючі методи корекції вихідної потужності СМЕГ засновані на застосуванні зовнішніх ступінчастих ємнісних регуляторів. Вони, з одного боку, навантажують генератор додатковим реактивним ємнісним струмом, з іншого боку вимагають системи комутації, що ускладнює конструкцію в цілому і знижує її надійність. Пропонована система позбавлена даних недоліків, дозволяє плавно регулювати вихідну потужність в заданому діапазоні навантаження. Вона дозволяє підвищити ефективність перетворення механічної енергії вітру в електричну за рахунок роботи на максимумах потужності та не викликає додаткових втрат в обмотці якоря.

Обмеження запропонованого методу пов'язані з обмеженими межами регулювання в порівнянні із системами з електромагнітним збудженням. Крім того, постійні магніти, що застосовуються в даному СМЕГ, мають обмеження по магнітним характеристикам при підвищених теплових режимах. Крім того, досліджуваний синхронний магнітоелектричний генератор дорожчий від генераторів зі збудженням від постійних магнітів на ≈ 15 –20 %. В порівнянні з нерегульованою системою, реалізація запропонованої системи керування мак-

симальною потужністю збільшить загальну вартість системи (вітрова турбіна, електрогенератор, перетворювач, акумуляторна батарея) $\approx 0,05\text{--}0,07\%$.

Недоліки корекції вихідної потужності вітроагрегату за рахунок використання струму збудження додаткової обмотки пов'язані із більшою вартістю самого СМЕГ в порівнянні із генераторами із постійними магнітами. Також із втратами потужності в обмотці СМЕГ, які можуть становити до 5 % потужності генератора та необхідністю системи керування додатковою обмоткою.

Розвиток даного дослідження лежить у галузі виготовлення експериментальних зразків вітрогенеруючих установок у складі із СМЕГ, що дозволить підвищити ефективність перетворення механічної енергії вітру в електричну. Також, на основі отриманих результатів впливає декілька методів корекції вихідної потужності синхронного генератора, що можуть бути описані в подальшому.

7. Висновки

1. Розроблено систему автоматичного керування відбором максимальної потужності на основі регулювання робочого магнітного потоку магнітоелектричного генератора шляхом зміни струму додаткової обмотки збудження. Це дозволяє підвищити ефективність перетворення механічної енергії вітру в електричну. Система керування складається з внутрішнього контуру керування струмом збудження та зовнішнього контуру керування потужністю.

2. Математична модель СМЕГ синтезована у системі координат $d\text{--}q$. Особливістю реалізованої математичної моделі є те, що завдання керування генератором зводиться до вирішення чотирьох локальних завдань керування лінійними підсистемами. Цього вдалося досягти за рахунок перетворення взаємопов'язаної нелінійної системи 4-го порядку на систему з 4-х лінійних рівнянь першого порядку.

3. Висока якість керування потужністю та струмом збудження забезпечується оригінальними алгоритмами керування, які розроблено на основі мінімізації локальних функціоналів миттєвих значень електромагнітної енергії. Закони керування забезпечують стійкість при параметричних та координованих збуреннях, а також простоту реалізації контролера. Система забезпечує відсутність статичної похибки регулювання, а також допустиму динамічну похибку до $\approx 18\%$ при зміні стрибком навантаження та швидкості вітру.

4. Дослідження процесу керування автономною вітроенергетичною установкою на прикладі дослідного зразка СМЕГ підтвердило високу якість регулювання максимальної потужності при зміні швидкості вітру від 3 до 8 м/с та зміні навантаження на 50 %.

Література

1. Gaddi, N. S., Malini, A. V. (2017). Hybrid Wind–Battery System for a Stand-Alone Wind Energy Conversion System. *International Journal of Innovative Research in Electrical, Electronics, Instrumentation and Control Engineering*, 5 (5), 42–48. doi: <https://doi.org/10.17148/ijireeice.2017.5508>

2. Choudhary, N., Garg, P. (2017). A Result Analysis of Control Scheme for a Stand-Alone Wind Energy Conversion System. *IARJSET*, 4 (1), 96–99. doi: <https://doi.org/10.17148/iarjset.2017.4122>

3. Tahiri, F. E., Chikh, K., Khafallah, M. (2019). Designing a Fuzzy-PI Controller of a Stand-Alone Wind Energy Conversion System for MPPT. *Lecture Notes in Intelligent Transportation and Infrastructure*, 1093–1106. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-11196-0_89
4. Chuang, N. (2014). Robust H_{∞} control of variable-speed wind turbines in partial load. 2014 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC). doi: <https://doi.org/10.1109/aupec.2014.6966563>
5. Kawaguchi, T., Sakazaki, T., Isobe, T., Shimada, R. (2012). Wind turbine generation system with simple rectifier using MERS in current link topology wind farm. 2012 15th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC). doi: <https://doi.org/10.1109/epepemc.2012.6397511>
6. Biletskyi, Y. O., Shchur, I. Z., Kuzyk, R.-I. (2021). Passivity-based control system for stand-alone hybrid electrogenerating complex. *Applied Aspects of Information Technology*, 4 (2), 140–152. doi: <https://doi.org/10.15276/aait.02.2021.2>
7. Shchur, I., Rusek, A., Makarchuk, O., Lis, M. (2013). The simulation model of a synchronous machine with permanent magnets that takes into account magnetic saturation. *Przegląd Elektrotechniczny*, 4, 102–105. URL: <http://pe.org.pl/articles/2013/4/22.pdf>
8. Kuznetsov, B. I., Nikitina, T. B., Bovdii, I. V. (2020). Multiobjective synthesis of two degree of freedom nonlinear robust control by discrete continuous plant. *Tekhnichna Elektrodynamika*, 2020 (5), 10–14. doi: <https://doi.org/10.15407/techne2020.05.010>
9. Watil, A., El Magri, A., Lajouad, R., Raihani, A., Giri, F. (2022). Multi-mode control strategy for a stand-alone wind energy conversion system with battery energy storage. *Journal of Energy Storage*, 51, 104481. doi: <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104481>
10. Lamzouri, F. E., Boufounas, E., El Amrani, A. (2021). Energy management and intelligent power control of a stand-alone wind energy conversion system with battery storage. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 31 (9). doi: <https://doi.org/10.1002/2050-7038.13003>
11. Chumack, V., Bazenov, V., Tymoshchuk, O., Kovalenko, M., Tsyvinskyi, S., Kovalenko, I., Tkachuk, I. (2021). Voltage stabilization of a controlled autonomous magnetolectric generator with a magnetic shunt and permanent magnet excitation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (5 (114)), 56–62. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.246601>
12. Chumack, V., Tsyvinskyi, S., Kovalenko, M., Ponomarev, A., Tkachuk, I. (2020). Mathematical modeling of a synchronous generator with combined excitation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1 (5 (103)), 30–36. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.193495>
13. Ostroverkhov, M., Chumack, V., Monakhov, Y. (2021). Control System of Autonomous Wind Turbine Based upon Hybrid Excited Synchronous Generator. 2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek). doi: <https://doi.org/10.1109/khpiweek53812.2021.9570018>