

ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Жуков Олексій Анатолійович

УДК 621.311.24

**МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ТА ПРИСТРОЇ ДЛЯ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ
ВІТРОВИМ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИМ КОМПЛЕКСОМ З ВЕРТИКАЛЬНОЮ ВІССЮ
ОБЕРТАННЯ**

Спеціальність 05.09.03 – Електротехнічні комплекси та системи

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Вінниця – 2011

Дисертацією є рукопис

Робота виконана у Вінницькому національному технічному університеті Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Мокін Борис Іванович,
Вінницький національний технічний університет,
професор кафедри відновлювальної енергетики та транспортних
електричних систем і комплексів.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Сінчук Олег Миколайович,
Кременчуцький національний університет ім. Михайла
Остроградського, завідувач кафедри систем електроспоживання
та енергетичного менеджменту;

доктор технічних наук, професор
Кутін Василь Михайлович,
Вінницький національний технічний університет, професор
кафедри електричних станцій та систем.

Захист відбудеться “22” квітня 2011 р. о 9³⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 05.052.05 у Вінницькому національному технічному університеті за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ауд. 210, ГНК.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Вінницького національного технічного університету за адресою: 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95.

Автореферат розісланий “ 18 ” березня 2011 р.

В.о. вченого секретаря
спеціалізованої вченої ради

Кухарчук В.В.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. У зв'язку зі щорічним збільшенням споживання людством енергії, зростаючими екологічними обмеженнями та стрімким ростом цін на непоновлювані органічні енергоресурси з кожним днем все актуальнішим стає збільшення обсягів отримання енергії за рахунок використання поновлювальних її джерел, особливо енергії вітру, яка у вітрових електричних установках перетворюється в електричну. Головними перевагами вітрових електричних установок (ВЕУ) є їх енергетична невичерпність, поновлювальність та екологічність.

В Україні збудовано ряд вітрових електроустановок, зокрема в Криму та на узбережжі Азовського моря, які є ВЕУ із горизонтальною віссю обертання вітрового колеса. В основному існуючі теоретичні розробки і практика використання присвячені саме такому типу коліс, а ВЕУ із вертикальною віссю обертання дослідженні набагато менше, хоча вони мають ряд переваг і можуть також ефективно працювати в багатьох районах. Переважна більшість вітрових електроустановок, незважаючи на тенденцію зростання їх потужності працюють у вузькому діапазоні зміни швидкості вітру, оскільки системи автоматичного керування ними не в змозі забезпечити стабільність частоти струму, що генерується та стабільність кутової швидкості обертання вітрових коліс при поривчастому характері вітрового навантаження. Основним способом стабілізації кутової швидкості вітрового колеса ВЕУ є зміна кутів нахилу його лопатей в залежності від потужності вітрового потоку. Такий спосіб є недосконалим, він зменшує коефіцієнт використання вітрової енергії ВЕУ від максимально можливого, ускладнює конструкцію вітрового колеса та суттєво ускладнює систему керування. Тому актуальною є задача розробки такого пристрою та способу керування ВЕУ, із змінною швидкістю обертання вітрового колеса, який би забезпечував роботу її із жорстко фіксованими лопатями у широкому діапазоні зміни швидкостей вітру, максимально можливий відбір потужності від вітрового електротехнічного комплексу (ВЕК) та прийнятну якість генерованої напруги.

Розв'язанню цієї задачі стосовно ВЕУ з вертикальною віссю обертання і присвячена робота.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Основний зміст роботи складають результати досліджень, що проводились на кафедрі електромеханічних систем автоматизації в промисловості і на транспорті та на кафедрі відновлювальної енергетики та транспортних електричних систем і комплексів Вінницького національного технічного університету протягом 2006-2010 років. Науково-дослідна робота проводилась відповідно до наукового напрямку "Розробка математичних моделей процесів, що протікають в енергетичних та екологічних системах, інформаційно-вимірювальних систем та систем автоматичного та автоматизованого керування цими процесами", у ролі виконавця, за держбюджетною темою № 84-Д-326 "Розробка вітроенергетичних модулів з прямим перетворенням енергії вітру в електричну" (номер державної реєстрації № 0110U002165).

Мета і завдання дослідження. Метою дослідження є підвищення ефективності використання вітрового потоку вітровим електротехнічним комплексом, шляхом створення системи автоматичного керування цим комплексом за критерієм відбору максимуму потужності.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- провести аналіз відомих структур ВЕК та їх систем керування і визначити область застосування ВЕК з вертикальною віссю обертання вітрового колеса;
- удосконалити математичні моделі сил, що діють на вітрове колесо з вертикальною віссю обертання, при нульових та ненульових кутах повороту лопатей;
- розробити математичну модель та закон керування ВЕК за критерієм відбору максимуму потужності електроенергії, що генерується;
- розробити структуру системи автоматичного керування ВЕК, яка реалізує запропонований закон керування;

- розробити конструкцію електромеханічного перетворювача енергії вітру безпосередньо в електричну енергію та розрахувати її параметри для застосування в БЕК;
- розробити комп'ютерну модель вітрового електротехнічного комплексу та дослідити її на стійкість з метою визначення робочих параметрів автоматичного регулятора;
- адаптувати алгоритм функціонування та структуру регулятора системи керування БЕК до умов його мікропроцесорної реалізації.

Об'єктом дослідження в дисертаційній роботі є вітровий електротехнічний комплекс з вертикальною віссю обертання вітрового колеса.

Предметом дослідження є процеси управління динамікою вітрового електротехнічного комплексу з вертикальною віссю обертання вітрового колеса для регулювання його потужності.

Методи дослідження. В дисертації для аналізу і вирішення поставлених завдань використані такі методи дослідження: методи теорії автоматичного керування для створення математичної моделі вітрового колеса із вертикальною віссю обертання та структури системи автоматичного керування БЕК, методи нечіткої логіки для синтезу структури регулятора, методи електротехніки для розробки конструкції електромеханічного перетворювача енергії вітру в електричну енергію.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному:

1. Вперше розроблено закон керування для регулятора струму збудження вітрового електротехнічного комплексу з прямим перетворенням енергії вітру в електричну, що забезпечує його роботу у точці максимального відбору потужності вітрового колеса.

2. Вдосконалено математичну модель вітрового колеса з вертикальною віссю обертання в динаміці, що на відміну від відомих дозволяє формувати закони керування вітровою електричною установкою та забезпечує можливість оптимізації її функціонування.

3. Вдосконалено математичну модель системи керування вітровим електротехнічним комплексом з вертикальною віссю обертання вітрового колеса із застосуванням теорії нечітких множин, що дозволяє покращити якість напруги на виході вітрового електротехнічного комплексу.

4. Отримав подальший розвиток підхід до побудови комбінованого регулятора збудження вітрового електротехнічного комплексу, що полягає у поєднанні переваг чіткого і нечіткого законів керування та дозволяє забезпечити максимально ефективне керування в широкому діапазоні зміни швидкостей вітру.

Практичне значення одержаних у роботі результатів полягає в наступному:

1. Розроблено регулятор системи автоматичного керування вітровим електротехнічним комплексом з врахуванням атмосферних впливів, що являє собою комбінований регулятор, який складається з ПІ-регулятора та нечіткого регулятора, які працюють по чергові в залежності від швидкості вітрового потоку, що дозволяє проводити одночасне керування вітровим електротехнічним комплексом в функції напруги та максимуму відбору потужності.

2. Адаптовано модель системи автоматичного керування струмом збудження генератора БЕК у середовищі Matlab Simulink, що дозволяє отримувати параметри налагодження регулятора для встановлення заданої напруги на вводах ВЕУ та потрібного режиму відбору потужності.

3. Розроблено структурну схему мікропроцесорного засобу та алгоритм його роботи для реалізації функцій регулятора системи автоматичного керування струмом збудження вітрового електротехнічного комплексу на базі контролера з підтримкою Fuzzy Logic, що дозволяє підвищити гнучкість та спростити процес налагодження запропонованої системи.

4. Реалізовано експериментальну ВЕУ прямого перетворення енергії вітру в електричну із вертикальною віссю обертання на якій здійснена перевірка теоретичних положень.

Результати дисертаційної роботи впроваджено в навчальний процес Вінницького

національного технічного університету та в Проектно-конструкторському технологічному бюро «Конкорд», м. Дніпропетровськ, що підтверджено відповідними актами.

Особистий внесок здобувача. Основні положення та результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно. У роботах, опублікованих у співавторстві, автору належить: [1] – здійснено аналіз наукових робіт в галузі вітроенергетики, визначені сфери застосування вітрових коліс з лопатями, жорстко прикріпленими до основи (комеля) ротора; [2] – побудовано векторні діаграми швидкостей повітряних потоків, що діють на лопаті вітрового колеса з вертикальною віссю обертання, та сил, створюваних цими потоками, при рівному нулю кутів повороту лопаті відносно дотичної в точці спряження лопаті з ободом вітрового колеса; [3] – побудовано векторні діаграми сил, створюваних повітряними потоками, що діють на лопаті вітрового колеса з вертикальною віссю обертання при не рівному нулю кутів повороту лопаті відносно дотичної в точці спряження лопаті з ободом вітрового колеса; [4] структура системи автоматичного керування ВЕК з вертикальною віссю обертання ВК; [5] – зроблено синтез математичної моделі пристрою керування вітровою енергетичною установкою з вертикальною віссю обертання із використанням елементів теорії нечітких множин; [6] – запропоновано структурну схему регулятора збудження вітрової електричної установки; [7] – запропоновано варіанти конструктивного виконання вітроенергетичної установки.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати виконаних в дисертації досліджень доповідались та обговорювались на таких міжнародних і регіональних конференціях та наукових семінарах: XII Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика» (м. Кременчук, травень 2010 р.); XXI Міжнародна науково-практична конференція «Відновлювальна енергетика XXI століття» (АР Крим, смт Миколаєвка, вересень 2010 р.); X Міжнародна науково-технічна конференція «Контроль і управління в складних системах (КУСС-2010)» (м. Вінниця, жовтень 2010 р.). Щорічні науково-технічні конференції професорсько-викладацького складу, співробітників та студентів університету з участю працівників науково-дослідних організацій та інженерно-технічних працівників підприємств м. Вінниці та області на базі ВНТУ в 2006-2010 роках.

Публікації. Основний зміст роботи опублікований в 7 друкованих працях, серед яких: 5 статей у наукових фахових виданнях, що входять до переліку ВАК України, один патент України на корисну модель, одні тези доповідей.

Обсяг і структура дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел (143 найменувань), двох додатків. Основний зміст викладений на 121 сторінках друкованого тексту, містить 60 рисунків, 11 таблиць. Загальний обсяг роботи 165 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність досліджень, зазначено зв'язок роботи з науковими програмами, темами. Вказано мету та задачі досліджень. Приведено характеристику наукової новизни та практичного значення одержаних результатів, а також описано їх апробацію, публікації та впровадження.

У першому розділі Здійснено аналіз відомих електромеханічних перетворювачів енергії вітру в електричну енергію та їх систем керування.

Аналіз існуючих варіантів систем керування для вітроенергетичних установок взагалі та з вертикальною віссю обертання зокрема показав ряд суттєвих недоліків. До основних слід віднести відсутність або недосконалість систем керування збудженням електромеханічного перетворювача (редукторного чи безредукторного), що перешкоджає отриманню електроенергії належної якості. Іншим важливим моментом є недосконалість способу виходу вітрової установки на точку відбору максимальної потужності, оскільки в більшості запропонованих варіантах розглядається замкнений контур для гасіння

надлишкової швидкості ВК, що призводить до роботи системи керування ВЕУ в режимі короткого замикання. Крім того, слід підкреслити, що переважна більшість ВЕУ має в своєму складі електромеханічний перетворювач у вигляді окремого вузла, що з'єднується з ВК за допомогою редуктора, в якому втрачається частина енергії. В детальному аналізі кожен з розглянутих варіантів має ще ряд недоліків.

Охарактеризовано області застосування в ВЕУ вітрових коліс з горизонтальною та вертикальною осями обертання і визначено область застосування вітрових електротехнічних комплексів з вертикально-осьовими вітровими колесами. Такими областями є місця, де вітровий потік змінюється не імпульсно, а монотонно, наприклад гірські ущелини чи каньйони, які являються концентраторами вітрового потоку.

На підставі проведеного аналізу сформульовано мету і задачі дисертаційної роботи.

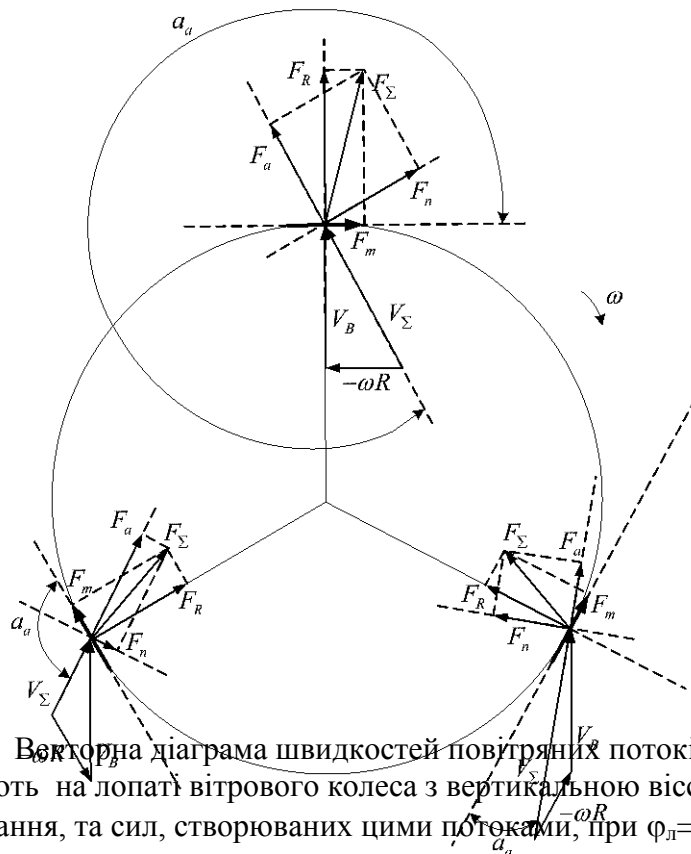


Рис.1. Векторна діаграма швидкостей повітряних потоків, що діють на лопаті вітрового колеса з вертикальною віссю обертання, та сил, створюваних цими потоками, при $\varphi_l = 0$

У другому розділі побудовано векторні діаграми швидкостей повітряних потоків, що діють на лопаті вітрового колеса з вертикальною віссю обертання, та сил, створюваних цими потоками, при рівному нулю (рис. 1) та відмінному від нуля куті повороту лопаті відносно дотичної в точці спряження лопаті з ободом вітрового колеса та запропоновано новий підхід і побудовані математичні моделі сил, які виникають на лопатях вітрового колеса з вертикальною віссю обертання, з використанням цього підходу. Розроблено методику ідентифікації запропонованих математичних моделей для сил, які виникають на лопатях вітрового колеса з вертикальною віссю обертання, що дозволяє визначити момент обертання на валу вітрового колеса. На цьому рисунку: ω – кутова швидкість обертання

вітрового колеса навколо осі, V_B – швидкість вітрового потоку, R – радіус вітрового колеса, ωR – окружна швидкість лопаті, V_Σ – швидкість результуючого вітрового потоку, що набігає на лопать, φ_l – кут повороту лопаті відносно площини обертання вітрового колеса, α_a – кут атаки лопаті результуючим вітровим потоком, F_a – сила аеродинамічного тиску результуючого вітрового потоку на лопать, F_n – аеродинамічна підйомна сила, що діє на лопать, F_Σ – результуюча аеродинамічна сила, що діє на лопать, F_R – сила лобового вітрового тиску на лопать, F_m – сила тяги, яка створює обертовий момент.

Із приведеної на рис.1 векторної діаграми легко бачити, що кут атаки α_a результуючого вітрового потоку на лопать вітрового колеса з вертикальною віссю обертання за кожен повний оборот цього колеса отримує додатковий приріст у 360° . А це дає привід на часових відрізках, в межах яких вектор швидкості вітру не змінює своєї направленості, при

побудові математичної моделі для усіх сил, що прикладені до вітрового колеса з трьома лопатями, зміщеними по відношенню одна до одної на кут $2\pi/3$, використати аналогію з трифазним генератором змінного струму, для фазних електрорушійних сил. Тому для сили F_{Σ} , яка створюється аеродинамічним тиском сумарного повітряного потоку, можемо записати математичну модель у вигляді (1), тобто:

$$\begin{aligned} F_{\Sigma 1} &= F_{\max} \sin(\omega t + \alpha_{an}) \\ F_{\Sigma 2} &= F_{\max} \sin(\omega t + \alpha_{an} - 2\pi/3), \\ F_{\Sigma 3} &= F_{\max} \sin(\omega t + \alpha_{an} 4\pi/3) \end{aligned} \quad (1)$$

де α_{an} – значення кута атаки першої лопаті в момент початку відліку часу; $F_{\Sigma 1}$, $F_{\Sigma 2}$, $F_{\Sigma 3}$ – сумарна сила аеродинамічного тиску відповідно на першу, другу та третю лопаті, а F_{\max} – її амплітудне значення

По аналогії для системи сил F_{R1} , F_{R2} , F_{R3} можна записати, що

$$\begin{aligned} F_{R1} &= F_{\max}^R \sin(\omega t + \varphi_n) \\ F_{R2} &= F_{\max}^R \sin(\omega t + \varphi_n - 2\pi/3). \\ F_{R3} &= F_{\max}^R \sin(\omega t + \varphi_n - 4\pi/3) \end{aligned} \quad (2)$$

Значення сили F_a на лопаті 1 можна знайти із наступного співвідношення

$$F_{a1} = S_l \cos \angle(F_m, F_n) V_{\Sigma} \rho V_{\Sigma} k_F^a = k_F^a S_l \rho \frac{V_{\Sigma}^2}{\cos \angle(F_m, F_n)}, \quad (3)$$

в якому k_F^a – менший одиниці коефіцієнт, який характеризує відмінність «коридору» руху потоку повітря, направленому на лопать, від труби з прямокутним перерізом, рівним перерізу цієї лопаті, а $\angle(F_m, F_n)$ – кут між відповідними осями швидкісної і зв'язаної систем координат.

Для системи сил F_{a1} , F_{a2} , F_{a3} можна записати, що

$$\begin{aligned} F_{a1} &= F_{\max}^a \sin(\omega t + \psi_n) \\ F_{a2} &= F_{\max}^a \sin(\omega t + \psi_n - 2\pi/3), \\ F_{a3} &= F_{\max}^a \sin(\omega t + \psi_n - 4\pi/3) \end{aligned} \quad (4)$$

де ψ_n – початковий кут повороту вектора сили F_{a1} в момент часу $t=0$, узгоджений зі значенням початкового кута атаки α_{an} , а F_{\max}^a – амплітудне значення цієї сили, яке можна визначити з першого рівняння системи (4).

Оскільки вектор сили F_{m1} відстає від вектора сили F_{R1} на кут $\pi/2$, то можна записати, що

$$\begin{aligned} F_{m1} &= F_{\max}^m \sin(\omega t + \varphi_n - \pi/2) \\ F_{m2} &= F_{\max}^m \sin(\omega t + \varphi_n - \pi/2 - 2\pi/3). \\ F_{m3} &= F_{\max}^m \sin(\omega t + \varphi_n - \pi/2 - 4\pi/3) \end{aligned} \quad (5)$$

Діюче значення F_m^{∂} сили тяги можна знайти із співвідношення

$$F_m^{\partial} = \frac{1}{\sqrt{2}} F_{\max}^m, \quad (6)$$

а діюче значення $M_{об}^{\partial}$ обертового моменту – із співвідношення

$$M_{об}^{\partial} = F_m^{\partial} R, \quad (7)$$

в якому радіус вітрового колеса R є плечем, до якого прикладена сила F_m^{∂} .

Аналогічно, для визначення обертового моменту вітрового колеса, побудовані векторні діаграми та математичні моделі сил і швидкостей вітрових потоків для вітрового

колеса і кутом повороту лопатей, відмінним від нуля. При цьому з'являється нова величина – φ_l – кут повороту лопаті відносно площини, перпендикулярної до радіуса вітрового колеса в точці закріплення лопаті. Дана модель дозволяє здійснити простий і ефективний аналіз сил, що виникають при обертанні вітрового колеса з вертикальною віссю, що дозволить оптимізувати роботу ВЕУ з вітровим двигуном даного типу.

У третьому розділі розроблено структуру системи автоматичного керування, яка дозволяє працювати у точці максимального відбору потужності вітроколеса шляхом регулювання струму збудження генератора ВЕК, змінюючи в потрібному напрямку момент навантаження (рис. 2).

Сигнали від датчиків швидкості вітру, кутової швидкості обертання вітрового колеса, похідної від ковзного значення швидкості вітру, струму навантаження і напруги генератора подаються на регулятор збудження, який їх аналізує та видає сигнал на блок керування збудженням для підтримки струму збудження, а отже і моменту навантаження, на такому рівні, при якому швидкість обертання вітроколеса призводила б до оптимального відбору потужності.

Запропонована структура регулятора збудження побудована за каскадним принципом, де внутрішнім контуром є контур регулювання напруги, а зовнішнім контуром є контур підтримання швидкості вітрового колеса.

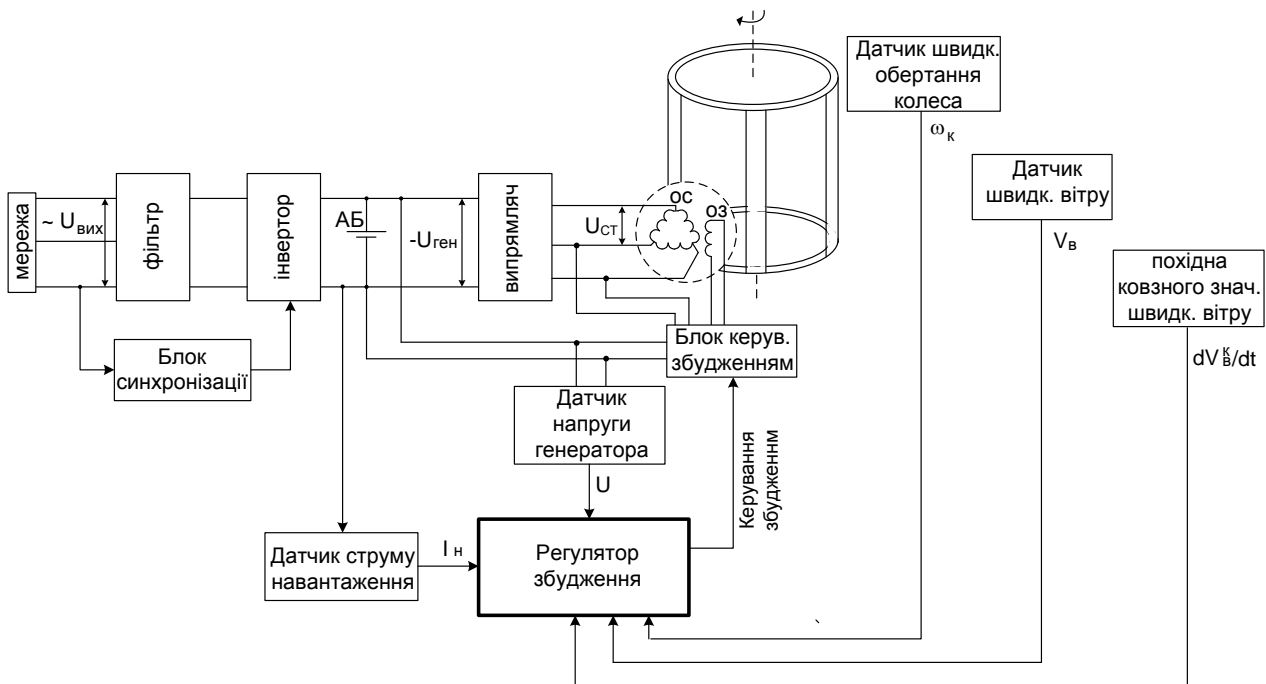


Рис. 2. Структура електротехнічного комплексу на основі ВЕУ з вертикальною віссю обертання

Загальна модель регулятора збудження може бути представлена у вигляді системи рівнянь

$$\left\{ \begin{aligned} \Delta\omega &= \begin{cases} |\omega_{opt} - \omega(t)| - k_v \cdot V_g(t), & \text{якщо } \frac{dV_g^K}{dt} < 0; \\ |\omega_{opt} - \omega(t)| + k_v \cdot V_g(t), & \text{якщо } \frac{dV_g^K}{dt} > 0; \end{cases} \\ U_{зад}(t) &= k_\omega \cdot \Delta\omega + \int_0^{2T} \Delta\omega dt; \\ \Delta U &= U_{зад}(t) - (U(t) - k_I I_H(t)); \\ I_{зб}(t) &= \left(k_u \cdot \Delta U + \int_0^T \Delta U dt \right). \end{aligned} \right. \quad (8)$$

В подальшому систему автоматичного керування вітровим електротехнічним комплексом з вертикальною віссю обертання вітрового колеса доповнено регулятором швидкості з нечітким логічним висновком, що дає змогу покращити якість керування ВЕУ за рахунок спрощення алгоритму керування (рис. 3).

В структурі системи виділено ФП — функціональний перетворювач, який забезпечує поступання на вхід суматора сигналу про швидкість вітру відповідно до закону керування (8).

Для структури системи автоматичного керування, представлені на рис. 3, в якій пропонується використовувати і нечіткий і ПІ-регулятор, які реалізуюватимуть закон керування (9).

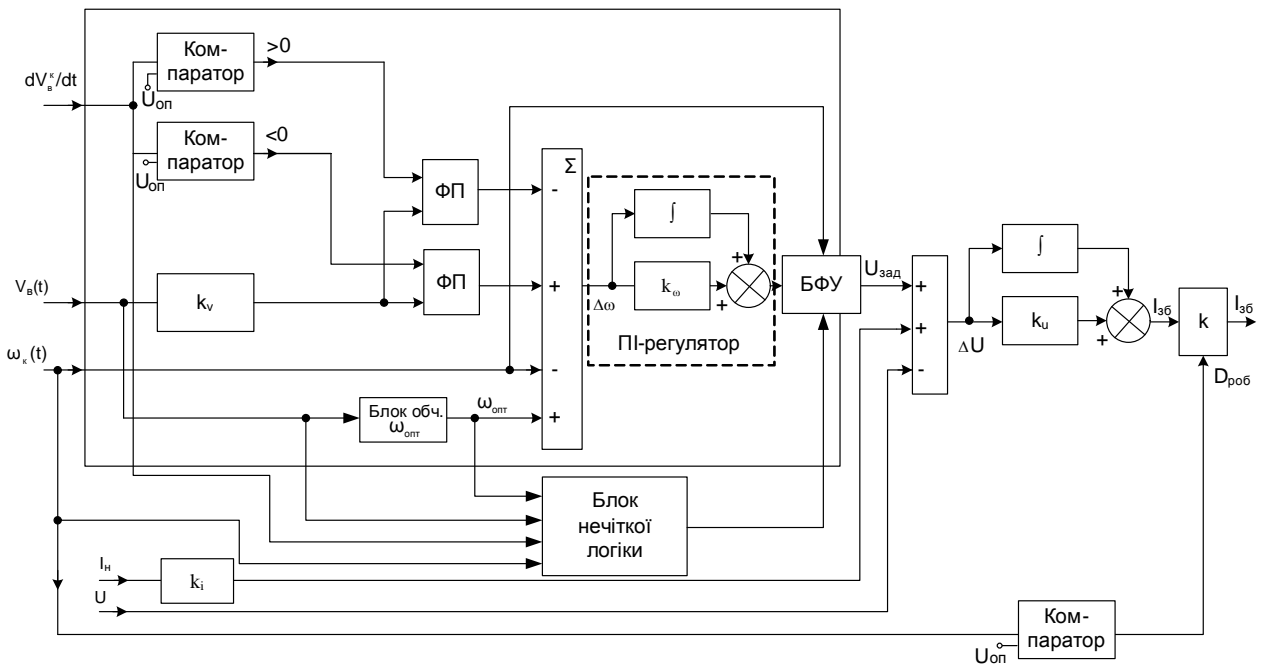


Рис. 3. Структурна схема системи керування збудженням генератора ВЕУ з вертикальною віссю обертання із застосуванням блока нечіткої логіки

При низькій швидкості обертання вітрового колеса пропонується використовувати математичну модель регулятора збудження з використанням нечіткої логіки, при високих швидкостях достатньо високі показники якості регулювання має ПІ-закон регулювання. Формування уставки (сигналу завдання) для регулятора напруги здійснюється з допомогою блоку формування уставки (БФУ), який виконує роль ключа. Вхід керування ключем сполучається входом регулятора по каналу вимірювання швидкості обертання вітрового колеса.

Для захисту вітроенергетичної установки від роботи на холостому ході введемо в закон регулювання дискретну величину $k_{роб}$.

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta\omega = \begin{cases} |\omega_{онм} - \omega(t)| - k_v \cdot V_{\theta}(t), \text{ якщо } \frac{dV_{\theta}^k}{dt} < 0; \\ |\omega_{онм} - \omega(t)| + k_v \cdot V_{\theta}(t), \text{ якщо } \frac{dV_{\theta}^k}{dt} > 0; \end{cases} \\ U_{зад}(t) = \begin{cases} k_{\omega} \cdot \Delta\omega + \int_0^{2T} \Delta\omega dt; \text{ якщо } \omega_k > \omega_{кр}; \\ fuzzy\left(V_{\theta}, \frac{dV_{\theta}^k}{dt}, \omega_k, \omega_{онм}\right), \text{ якщо } \omega_k \leq \omega_{кр}; \end{cases} \\ \Delta U = U_{зад}(t) - (U(t) - k_I I_H(t)); \\ I_{зоб}(t) = \left(k_u \cdot \Delta U + \int_0^T \Delta U dt \right) \cdot k_{роб}. \end{array} \right. \quad (9)$$

Нечітка база знань представляється системою нечітких логічних рівнянь.

Нечітке логічне рівняння для одного із варіантів має вигляд:

$$\begin{aligned} \mu^{d_1}(d) = & [\mu^{DM}(X_1) \cdot \mu^{DM}(X_2) \cdot \mu^H(X_3) \cdot \mu^M(X_4)] \vee \\ & \vee [\mu^{DM}(X_1) \cdot \mu^{DM}(X_2) \cdot \mu^0(X_3) \cdot \mu^H(X_4)] \vee \\ & \vee [\mu^M(X_1) \cdot \mu^{DM}(X_2) \cdot \mu^H(X_3) \cdot \mu^M(X_4)]; \end{aligned} \quad (10)$$

де d_1 – показник, який відповідає терму «дуже малий», а $\mu(x_i)$, $i = \overline{1,5}$ – терми лінгвістичних змінних. Застосування регулятора з нечітким керуванням забезпечить більш стійку роботу ВЕУ при низьких швидкостях вітру із врахуванням погодних умов.

Різницю між виробленою потужністю ВЕУ, що працює з постійним навантаженням та максимально можливою її потужністю, проілюструємо графіками на рис. 4, рис. 6 та на рис. 5.

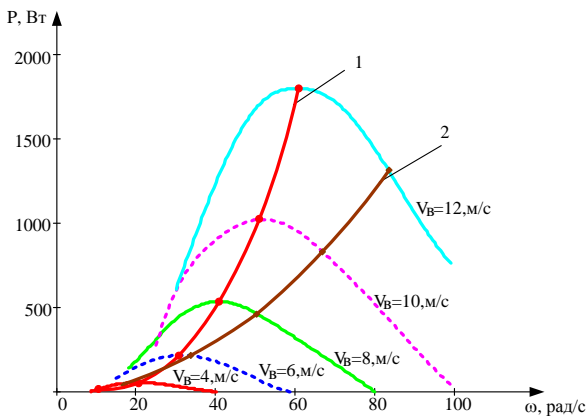


Рис. 4. Криві потужностей вітрової турбіни при її роботі із постійним навантаженням (2) та максимальною потужністю (1)

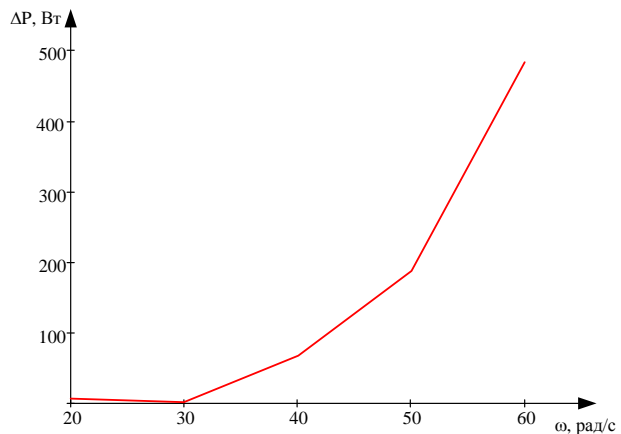


Рис. 5. Різниця між максимально можливою потужністю та потужністю, турбіни при її роботі із постійним навантаженням

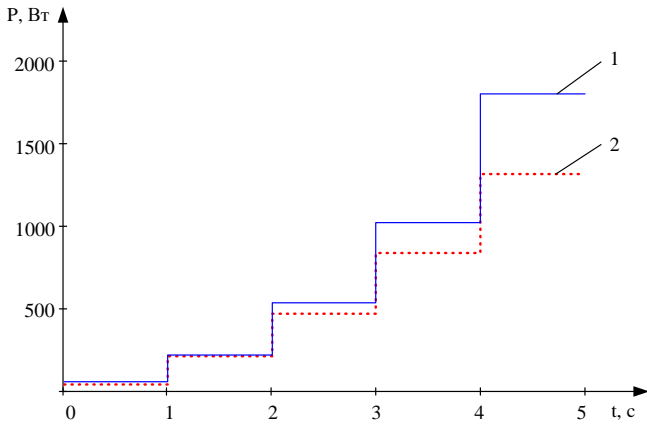


Рис. 6. Потужність, вироблена турбіною при її роботі із постійним навантаженням (2) та максимально можлива потужність (1)

самовентиляція.

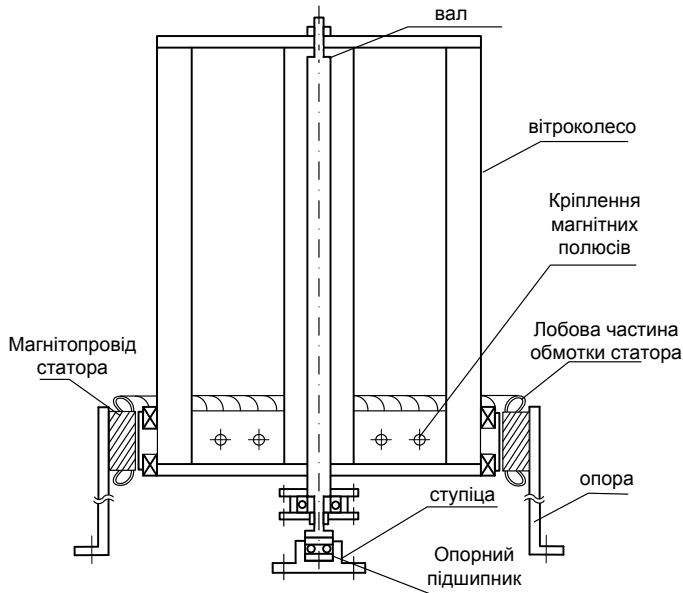


Рис. 7. Конструкція електромеханічного перетворювача вітру в електричну

перетворювач, ТТ – D-тригер.

Розроблена система автоматичного керування дозволяє збільшити ефективність використання вітрового потоку до 26,8 % відносно її роботи при постійному навантаженні без впливу на момент обертання.

У четвертому розділі запропоновано конструкцію безредукторного електромеханічного перетворювача (рис.7) енергії вітру в електричну і здійснено розрахунок його параметрів для заданого значення потужності 2 кВт, при номінальній лінійній напрузі 230 В, номінальній частоті обертання 360 об/хв, коефіцієнту потужності 0,8, числу фаз 3, за умови, що охолодження – повітряне,

На основі розроблених в третьому розділі математичних моделей та структури пристрою керування збудженням ВЕК запропоновано мікропроцесорну реалізацію та алгоритм роботи мікропроцесорного пристрою керування збудженням ВЕК, зображеного на рис 8, на якому : СШВ – сенсор швидкості вітру; СШ – сенсор кутової швидкості обертання ВК; СН – сенсор напруги на навантаженні; СС – сенсор струму навантаження; П – нормуючий перетворювач; МК – мікроконтролер; К – клавіатура; ПІ – послідовний інтерфейс; ПП – каскадний підсилювач струму збудження; ОЗ – обмотка збудження ВЕУ; АЦП – аналогово-цифровий перетворювач; ЦАП – цифро-аналоговий

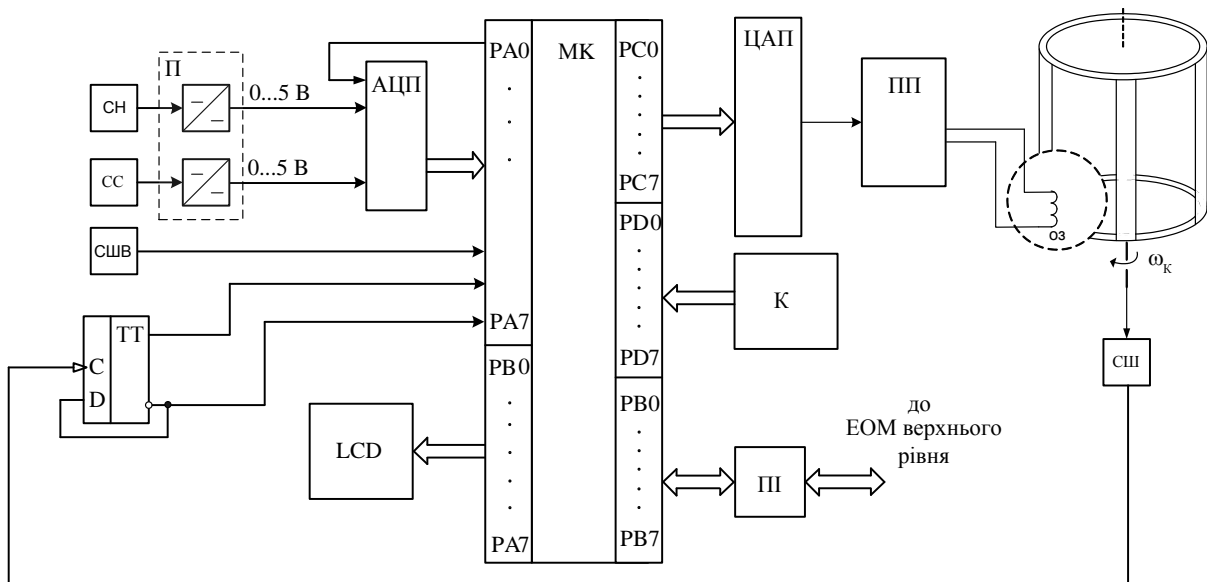


Рис. 8. Структурна схема мікропроцесорного пристрою керування струмом збудження генератора ВЕК

Пристрій забезпечує вимірювання і аналіз параметрів роботи ВЕУ і на основі цього здійснює регулюючий вплив через каскадний підсилювач на обмотку збудження ВЕУ прямого перетворення енергії вітру в електричну. Пристрій забезпечує роботу для двох режимів – нечіткої та чіткої логіки, залежно від швидкості обертання вітрового колеса.

Сигнали з виходу сенсорів параметрів, які відповідають значенню швидкості вітру, кутової швидкості обертання ВК, значення напруги на виході ВЕУ та струму, що віддається в навантаження, подаються через перетворювач рівнів сигналів П, який приводить вхідні сигнали до рівня напруги, яка необхідна для нормальної роботи мікроконтролера 6, на відповідні входи PA0–PA7 8-канального АЦП. При цьому, сигнал від СШ поступає на вхід МК через D-тригер, який служить для того, що отримувати інформацію про швидкість при наявності імпульса від сенсора, так і під час паузи. Мікроконтролер МК здійснює по чергове підключення кожного вимірювального каналу і відпрацьовує отриманий сигнал згідно закладеного алгоритму.

Рідкокристалічний індикатор LCD та клавіатура К дозволяє організувати обмін даними між мікроконтролером та оператором для керування роботою пристрою. Перетворювач рівнів сигналів 8 забезпечує зв'язок мікроконтролера МК з ЕОМ верхнього рівня. Сигнали із виходів PC0–PC7 подаються на цифроаналоговий перетворювач ЦАП, із якого вихідний аналоговий сигнал поступає на каскадний підсилювач ПП, підсилений сигнал із підсилювача поступає на обмотку збудження ОЗ ВЕУ.

Розроблено комп'ютерну модель системи керування збудженням у середовищі Matlab Simulink (рис. 9), яка дозволяє дослідити роботу системи керування ВЕК в різних режимах, при наявності різних видів збурень та проводити швидке налаштування коефіцієнтів настройки регулятора збудження ВЕК.

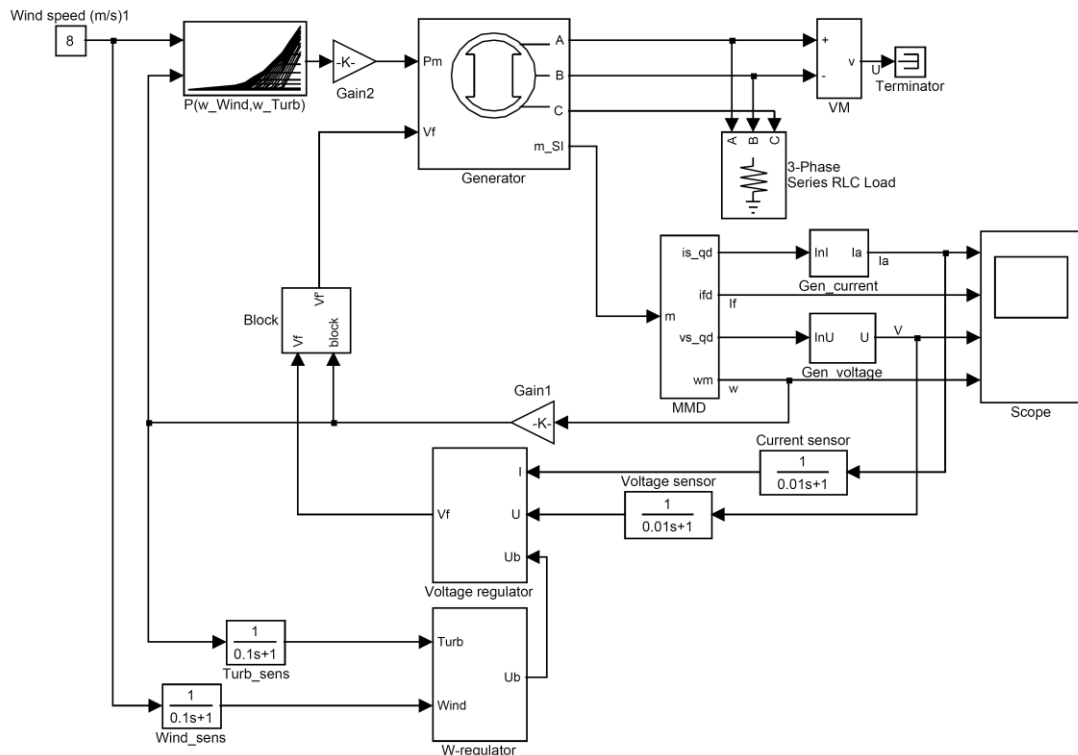


Рис. 9. Модель системи автоматичного керування ВЕК

Головний регулятор системи керування ВЕУ представлений як регулятор формування сигналу опорної напруги для внутрішнього (підпорядкованого) контуру регулювання струму збудження у функції ряду змінних, а саме: швидкості вітру та похідної ковзного середнього швидкості вітру, швидкості обертання вітрової турбіни. Структура регулятора представлена на рис. 10.

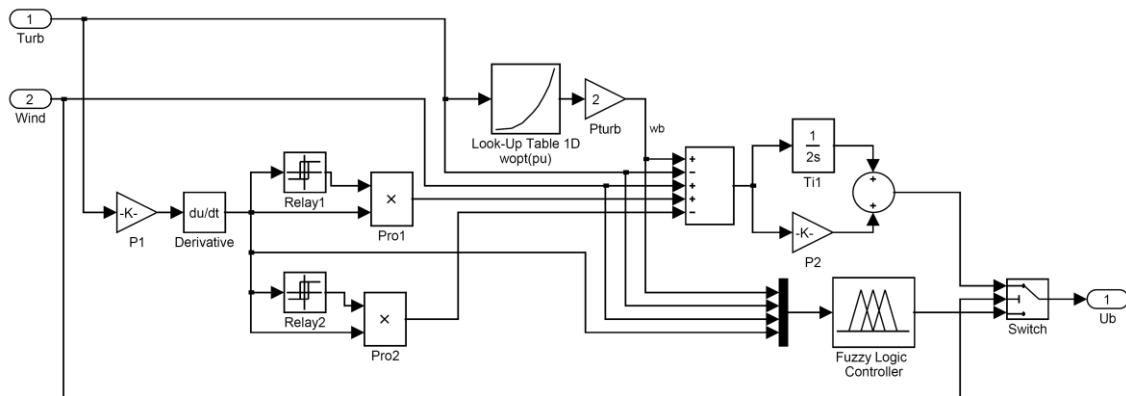


Рис.10. Модель головного регулятора *W-regulator* системи керування

В дисертації досліджено перехідні процеси, які протікають в системі керування при постійному навантаженні (біля 1000 Вт), але зміні швидкості вітру від 6 до 12 м/с. Розгін ВК здійснюється при початковій швидкості вітру 12 м/с. Промодельовано зменшення швидкості вітру до 6 м/с. Зменшення механічної енергії на валу перетворювача призводить до зниження електроенергії, яка виробляється за допомогою ВЕУ. При постійному електричному навантаженні нестача енергії викличе зниження напруги та зростання струму навантаження. Для компенсації зниження напруги системою автоматичного керування збільшується струм збудження, що обмежує провал напруги. Аналогічно може бути описаною робота системи при зворотній зміні вітру – тоді регулюючий вплив направлений на зниження струму збудження.

При моделюванні встановлено, що у даній системі недостатня реакція з метою утримання ВЕК в точці відбору максимальної потужності (ВМП). Оскільки намагання отримати якісну електроенергію в умовах експлуатації ВЕК може протирічати умові утримання її в точці ВМП. Тож необхідно один із цих параметрів брати за основний, а інший гратиме допоміжну роль. Зміну цієї ролі відіграє ваговий коефіцієнт k_w (9), що дозволяє формувати задаючу напругу збудження в функції відбору максимальної потужності.

Стабілізації напруги на виході перетворювача сприяє контур зворотного зв'язку системи. Зміна навантаження порушує рівновагу електромеханічної системи і веде до встановлення нового режиму. Цьому протидіє система керування збудженням генератора ВЕК, оскільки нові режими завжди будуть відповідати новому усталеному рівню напруги, а її потрібно підтримувати стабільною. Отже, невідповідність виробленої електроенергії при постійній швидкості вітру до спожитої навантаженням буде призводити до зміни кутової швидкості обертання валу (при постійній швидкості вітру).

Для експериментального визначення функції максимумів потужності вітрової турбіни в лабораторних умовах та для отримання сімейства вітроенергетичних характеристик ВЕУ із вертикальною віссю обертання прямого перетворення енергії вітру в електричну, була розроблена і виготовлена установка.

Даний стенд являє собою ВЕУ з прямим перетворенням енергії вітру в електричну, частотний перетворювач, реостат для електричного навантаження, та систему вимірювання. Над ВК розміщується кожух, в якому встановлено вентилятор, що приводиться у рух трифазним асинхронним двигуном.

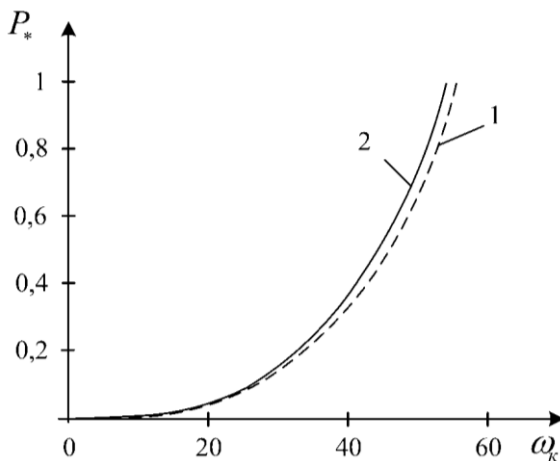


Рис. 11. Крива максимумів вітроенергетичних характеристик отримана аналітично (2) та експериментально (1)

Вентилятор створює розрідження всередині ВК, яке, внаслідок цього, приводиться в рух набігаючим потоком повітря ззовні.

Криву максимумів вітро-енергетичних характеристик отриманих експериментально приведемо на одній координатній площині разом із теоретично отриманою кривою, виразивши потужність у відносних одиницях (рис. 11).

Близькість теоретичної (2) та експериментальної (1) кривої підтверджує адекватність розроблених моделей. Похибка моделі 10,87%.

У додатках наведено акти впровадження результатів дисертаційної роботи та результати моделювання.

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі наведено нове вирішення науково-прикладної задачі розробки пристрою автоматичного керування вітровим електротехнічним комплексом, з прямим перетворенням енергії вітру в електричну, що відрізняється від відомих законом регулювання, який дозволяє відбирати максимум потужності від вітрового колеса і стабілізувати напругу на виході вітрової установки, та його технічною реалізацією, що дозволяє підвищити ефективність використання енергії вітрового потоку на 26,8 %.

За результатами виконаного при написанні дисертації дослідження можна зробити наступні висновки:

1. Визначено область застосування вітрових електротехнічних комплексів з вертикальною віссю обертання вітрового колеса, в якій такі комплекси мають перевагу у порівнянні з горизонтально-осьовими вітровими електричними станціями. Показано, що найбільшого ефекту від застосування вітрових електротехнічних комплексів з вертикальною

віссю обертання вітрового колеса можна досягти при їх застосуванні для електропостачання населених пунктів, розташованих у гірських каньйонах і ущелинах, де відбирається додаткова потужність, що обумовлена стисненням повітряних потоків у звуженнях стін каньйонів і ущелин, де є можливість вертикально нарощувати кількість вітрових двигунів.

2. Запропоновано математичну модель для швидкостей вітру і сил, що виникають на лопатях вітрового колеса з вертикальною віссю обертання, в динаміці. При розробленні цієї математичної моделі використано аналогію між магніторушійною силою обмотки збудження електричного генератора та силою вітру, а також між електрорушійними силами обмотки якоря електричного генератора та силами, що виникають на поверхнях лопатей вітрового колеса. Розроблену математичну модель адаптовано до різних значень кута нахилу лопатей до радіуса вітрового колеса, проведеного в точці закріплення лопаті.

3. Вперше розроблено закон керування для регулятора струму збудження вітрового електротехнічного комплексу з прямим перетворенням енергії вітру в електричну енергію та математичну модель процесу регулювання цього комплексу в режимі максимуму відбору потужності від вітрового колеса з використанням в якості складової частини математичної моделі для швидкостей вітру і сил, що виникають на лопатях вітрового колеса з вертикальною віссю обертання.

4. Запропоновано структуру системи керування вітровим електротехнічним комплексом з вертикальною віссю обертання вітрового колеса, яка забезпечує його роботу у точці максимуму відбору потужності вітрового колеса. В запропонованій структурі передбачено використання як ПІ-регулятора, так і нечіткого регулятора, кожний із яких включається в роботу в залежності від співвідношення заданої уставкою та реальної швидкості вітру і дозволяє здійснювати керування одночасно у функції напруги та максимуму відбору потужності.

5. Для покращення якості електричної енергії, отримуваної за допомогою вітрового електротехнічного комплексу з вертикальною віссю обертання вітрового колеса, удосконалено математичну модель процесу керування з застосуванням теорії нечітких множин і запропоновано структуру нечіткого регулятора та комбінованого пристрою керування, а також їх мікропроцесорну реалізацію на базі контролера з підтримкою Fuzzy Logic, який реалізує синтезовані математичні моделі і закони керування.

6. Адаптовано модель розробленої системи автоматичного керування струмом збудження вітрового електротехнічного комплексу з вертикальною віссю обертання вітрового колеса у середовищі Matlab Simulink та здійснено дослідження стійкості роботи та якості генерованої вітровим електротехнічним комплексом напруги і визначено умови настройки параметрів налагодження регуляторів системи керування для отримання напруги заданої якості та режиму відбору потужності в заданому діапазоні.

У галузі практичного застосування:

1. Розроблено регулятор системи автоматичного керування вітровим електротехнічним комплексом з врахуванням атмосферних впливів, що являє собою комбінований регулятор, який складається з ПІ-регулятора та нечіткого регулятора, які працюють по чергово в залежності від швидкості вітрового потоку, що дозволяє проводити одночасне керування вітровим електротехнічним комплексом в функції напруги та максимуму відбору потужності.

2. Адаптовано модель системи автоматичного керування струмом збудження генератора ВЕК у середовищі Matlab Simulink, що дозволяє отримувати параметри налагодження регулятора для встановлення заданої напруги на вводах ВЕУ та потрібного режиму відбору потужності.

3. Розроблено структурну схему мікропроцесорного засобу та алгоритм його роботи для реалізації функцій регулятора системи автоматичного керування струмом збудження вітрового електротехнічного комплексу, що дозволяє підвищити гнучкість та спростити процес налагодження запропонованої системи.

7. Запропоновано конструкцію електромеханічного перетворювача для прямого перетворення енергії вітру в електричну енергію і адаптовано до неї методику визначення усіх її параметрів та приведено приклад розрахунку для конкретних вихідних умов.

8. Реалізовано експериментальну ВЕУ прямого перетворення енергії вітру в електричну із вертикальною віссю обертання на якій здійснена перевірка теоретичних положень.

9. Експериментально перевірені теоретичні положення і розраховано похибку моделі, яка складає 10,87 %, що підтвердило адекватність розроблених математичних моделей.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Мокін Б. І. До питання вибору вітрових двигунів і електричних генераторів вітрових електричних станцій / Б.І.Мокін, О.Б.Мокін, О. А. Жуков // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2007. – №6. – С.52-62.

2. Мокін Б. І. Векторні діаграми та математичні моделі вітрового колеса з вертикальною віссю обертання [Електронний ресурс] / Б. І. Мокін, О. Б. Мокін, О. А. Жуков // Електронне науково-спеціалізоване видання Наукові праці Вінницького національного технічного університету – 2008. – Вип. 2. – Розділ: Енергетика і електротехніка. – Режим доступу до журн.: <http://www.nbu.gov.ua/e-journals/vntu/2008-2/2008-2.htm>

3. Мокін Б. І. Математичні моделі сил, що діють на вітрове колесо з вертикальною віссю обертання, при ненульових кутах повороту лопатей [Електронний ресурс] / Б. І. Мокін, О. Б. Мокін, О. А. Жуков // Електронне науково-спеціалізоване видання Наукові праці Вінницького національного технічного університету – 2008. – Вип. 3. – Розділ: Енергетика і електротехніка. – Режим доступу до журн. : <http://www.nbu.gov.ua/e-journals/vntu/2008-3/2008-3.htm>

4. Мокін Б.І. Система автоматичного керування електричною вітроенергетичною установкою з вертикальною віссю обертання / Мокін Б. І., Мокін О. Б., Жуков О. А. // Вісник Кременчуцького державного університету імені Михайла Остроградського . – 2010 – №4. – С. 36 – 39.

5. Мокін Б. І. Математична модель пристрою керування електричною вітроенергетичною установкою з вертикальною віссю обертання / Б.І.Мокін, О.Б.Мокін, О.А.Жуков // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2010. – №3. – С.48-54.

6. Мокін Б.І. Моделювання системи керування вітровою енергетичною установкою / Б.І. Мокін, О.Б. Мокін, О.А. Жуков, С.М. Левицький // Відновлювальна енергетика ХХІ століття: матеріали ХХІ міжнародної науково-практичної конференції (Крим, смт Миколаївка, вересень 2010 р.). – К., 2011. – С. 222-225.

7. Пат. 53362 Україна. Роторний вітродвигун: Пат. 53362 Україна, МПК (2009) F03D 9/00, F03D 9/02 / Б. І. Мокін, О. Б. Мокін, О. А. Жуков; заявник та патентоутримувач Вінницький національний технічний університет. — № у 2010 02049; Заявл.25.02.2010; Опубл. 11.10.2010, Бюл. №19.

АНОТАЦІЯ

Жуков О.А. Математичні моделі та пристрої для автоматичного керування вітровим електротехнічним комплексом з вертикальною віссю обертання. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.03 – Електротехнічні комплекси та системи. – Вінницький національний технічний університет, Вінниця, 2011.

Дисертація присвячена підвищенню ефективності використання потужності вітрового потоку вітровим електротехнічним комплексом прямого перетворення енергії вітру в електричну із вертикальною віссю обертання, шляхом створення системи автоматичного керування цим комплексом за критерієм відбору максимуму потужності.

Обґрунтовано актуальність досліджень, здійснено аналіз відомих електромеханічних перетворювачів енергії вітру в електричну енергію та їх систем керування. Запропоновано

новий підхід і побудовані математичні моделі сил, які виникають на лопатях вітрового колеса під дією повітряних потоків. Вперше розроблено закон керування для регулятора струму збудження вітрового електротехнічного комплексу та запропоновано його структуру, вдосконалено математичну модель системи керування із застосуванням теорії нечітких множин. Запропоновано мікропроцесорну реалізацію автоматичного регулятора керування струмом збудження та алгоритм її функціонування.

Методи і технічні засоби пройшли промислову апробацію і впроваджені на ПКТЬ «Конкорд» місто Дніпропетровськ.

Ключові слова: роторний вітродвигун, вітрова електрична установка, керування збудженням, максимум потужності, математична модель, автоматичний регулятор.

АННОТАЦІЯ

Жуков А.А. Математические модели и устройства для автоматического управления ветровым электротехническим комплексом с вертикальной осью вращения. – Рукопись.

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы. – Винницкий национальный технический университет, Винница, 2011.

Диссертация посвящена вопросу повышения эффективности использования мощности ветрового потока ветровым электротехническим комплексом прямого преобразования энергии ветра в электрическую, путем создания системы автоматического управления этим комплексом по критерию отбора максимума мощности.

Обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи исследований, научная новизна и практическая ценность работы; представлены сведения об апробации, публикациях и реализации работы.

Обоснована актуальность исследований, осуществлен анализ известных электромеханических преобразователей энергии ветра в электрическую энергию и их систем управления. Особое внимание уделено анализу существующих систем возбуждения электромеханических преобразователей (редукторных или безредукторных), их системам управления и способам выхода ветровой установки на точку отбора мощности. Выполнен анализ преимуществ и недостатков существующих систем.

Охарактеризованы области применения для ВЭУ ветровых колес с горизонтальной и вертикальной осями вращения и определена область применения ветровых электротехнических комплексов с вертикально-осевыми ветровыми колесами. Такими областями являются места, где ветровой поток меняется не импульсно, а монотонно, например горные ущелья или каньоны, что являются концентраторами ветрового потока.

Предложен новый подход и построены векторные диаграммы скоростей воздушных потоков, действующих на лопасти ветрового колеса с вертикальной осью вращения, и сил, создаваемых этими потоками, при равном нулю и отличном от нуля углу поворота лопасти относительно касательной в точке сопряжения лопасти с ободом ветрового колеса, предложен новый подход и построены математические модели сил, возникающих на лопастях ветрового колеса с вертикальной осью вращения под действием воздушных потоков, с использованием этого подхода. Разработана методика идентификации предложенных математических моделей для сил, возникающих на лопастях ветрового колеса с вертикальной осью вращения, что позволяет определить момент вращения на валу ветрового колеса.

Предложена структура системы автоматического управления, что позволяет работать в точке максимального отбора мощности ветроколеса путем регулирования тока возбуждения генератора ветрового электротехнического комплекса (ВЭЖ), изменяя в нужном направлении момент нагрузки, что позволит повысить коэффициент использования энергии ветра.

Усовершенствована математическая модель системы управления ветровым электротехническим комплексом с вертикальной осью вращения ветрового колеса с

применением теории нечетких множеств, что позволяет учитывать атмосферные влияния и повысить устойчивость работы ВЭК при низких скоростях ветра, для этого предложена структура нечеткого регулятора и комбинированного устройства управления, реализующего синтезированные законы управления и математические модели.

Впервые разработан закон управления для регулятора тока возбуждения ветрового электротехнического комплекса, с прямым преобразованием энергии ветра в электрическую, обеспечивающий работу ВЭК в точке максимального отбора мощности ветрового колеса, усовершенствована математическую модель системы управления с применением теории нечетких множеств.

Предложена конструкция безредукторного электромеханического преобразователя энергии ветра в электрическую и осуществлен расчет его параметров, такая конструкция позволяет исключить редуктор из состава ВЭУ, где теряется часть энергии.

Предложена микропроцессорная реализация автоматического регулятора управления током возбуждения ветрового электротехнического комплекса, алгоритм ее функционирования, также реализовано экспериментальную ВЭУ прямого преобразования энергии ветра в электрическую с вертикальной осью вращения на которой осуществлена проверка теоретических положений.

Методы и технические средства прошли промышленную апробацию и внедрены на ПКТБ «Конкорд» город Днепропетровск.

Ключевые слова: роторный ветродвигатель, ветровая электрическая установка, управление возбуждением, максимум мощности, математическая модель, автоматический регулятор.

ABSTRACT

Zhukov A.A. Mathematical models and devices for automatic control of complex electrical wind vertical axis of rotation. - Manuscript.

Thesis on the competition of candidate of technical sciences scientific degree in speciality 05.09.03 – Electrical complexes and systems. – Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, 2011.

The dissertation is devoted to improving efficiency wind power by wind flow electrical complex of direct conversion of wind power into electricity with a vertical axis of rotation, by establishing automatic control system for this complex criterion of maximum capacity.

The urgency of research, analysis of known electromechanical converters for wind energy into electrical energy and control systems is proved. A new approach and the mathematical model of forces that occur on the blade of wind wheel under the influence of air currents is proposed. The law of excitation current regulator control for wind electrical complex and its structure is proposed, mathematical model of control system using fuzzy sets is improved. A microprocessor implementation of automatic regulator and excitation current control algorithm of its functioning is suggested.

Methods and technical means have been technologically implemented and tested on ПКТБ "Concord" city of Dnipropetrovsk.

Key words: rotary wind turbine, excitation control, maximum power, mathematical model, automatic regulator.

Підписано до друку 15.03.2011 р. Формат 29.7×42 1/4
Наклад 100 прим. Зам. № 2011-076
Віддруковано в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі
Вінницького національного технічного університету.
м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95. Тел.: 59-81-59