

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

Б. І. Мокін, О. Б. Мокін, О. А. Жуков

**МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ТА СИСТЕМИ
АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ
ВІТРОВИМ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИМ КОМПЛЕКСОМ
З ВЕРТИКАЛЬНОЮ ВІССЮ ОБЕРТАННЯ
ВІТРОВОГО КОЛЕСА**

Монографія

Вінниця
ВНТУ
2017

УДК 621.311.24

М74

Рецензенти:

О. М. Сінчук, доктор технічних наук, професор

П. Д. Лежнюк, доктор технічних наук, професор

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 10 від 31 березня 2016 р.)

Мокін, Б. І.

М74 Математичні моделі та системи автоматичного керування вітровим електротехнічним комплексом з вертикальною віссю обертання вітрового колеса : монографія / Б. І. Мокін, О. Б. Мокін, О. А. Жуков. – Вінниця : ВНТУ, 2017. – 124 с.

ISBN 978-966-641-693-6

Здійснено аналіз відомих підходів та робіт, де розглядаються існуючі варіанти вітроенергетичних установок з вітровими колесами з вертикальною віссю обертання та їх систем керування. Описано нові математичні моделі та закони управління безредукторним вітровим електротехнічним комплексом та синтезовані авторами структури пристроїв автоматичного керування вітровим електротехнічним комплексом з вертикальною віссю обертання. Розраховано на інженерно-технічних працівників у сфері відновлювальної енергетики та в організаціях, що займаються проектуванням і експлуатацією вітрових електричних установок, а також студентів та аспірантів ВНЗ.

УДК 621.311.24

ISBN 978-966-641-693-6

© Б. Мокін, О. Мокін, О. Жуков, 2017

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	5
ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ КОНСТРУКЦІЙ І СТРУКТУР ВЕУ ТА ЇХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ.....	9
1.1 Характеристика вітрових коліс ВЕУ	9
1.2. Характеристика структур ВЕУ	12
1.3 Аналіз безредукторних вітрових електричних установок.....	18
1.4 Аналіз відомих систем автоматичного керування вітровими електроустановками.....	22
1.5 Аналіз алгоритмів пошуку точки максимуму відбору потужності від ВЕУ.....	27
1.6 Аналіз умов, за яких вертикально-осьові ВЕУ мають переваги	31
РОЗДІЛ 2 ВЕКТОРНІ ДІАГРАМИ ТА МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ВІТРОВОГО КОЛЕСА З ВЕРТИКАЛЬНОЮ ВІССЮ ОБЕРТАННЯ.....	34
2.1 Векторна діаграма вітрового колеса з горизонтальною віссю обертання	34
2.2 Побудова векторної діаграми сил і швидкостей та математичної моделі для вітрового колеса з вертикальною віссю обертання при $\phi_l = 0$	36
2.3 Побудова векторної діаграми та математичних моделей сил і швидкостей, що діють на вітрове колесо з вертикальною віссю обертання, при ненульових кутах повороту лопатей	41
РОЗДІЛ 3 СИНТЕЗ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ І ЗАКОНІВ КЕРУВАННЯ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНОЮ УСТАНОВКОЮ З ВЕРТИКАЛЬНОЮ ВІССЮ ОБЕРТАННЯ ТА СИСТЕМИ, ЩО ЇХ РЕАЛІЗУЄ.....	46
3.1 Характеристика ВЕУ як об'єкта керування та електротехнічного комплексу, в якому ВЕУ є основною структурною ланкою	46
3.2 Розробка законів керування, що реалізуються регулятором збудження, та його структури.....	54

3.3 Синтез регулятора швидкості обертання вітрового колеса з використанням нечіткої логіки	57
3.4 Застосування генетичних алгоритмів для врахування умов експлуатації ВЕУ та особливостей настройки системи керування	66
3.5 Адаптація структури системи автоматичного керування збудженням генератора ВЕУ з вертикальною віссю обертання та закону керування нею до симбіозу чітких і нечітких умов	70
РОЗДІЛ 4 РЕАЛІЗАЦІЯ НЕТИПОВИХ БЛОКІВ ВІТРОВОГО ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОГО КОМПЛЕКСУ З ВЕРТИКАЛЬНОЮ ВІССЮ ОБЕРТАННЯ ВІТРОВОГО КОЛЕСА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЙОГО СТІЙКОСТІ І ЯКОСТІ РЕГУЛЮВАННЯ	72
4.1 Методика розрахунку конструкції безредукторного електромеханічного перетворювача енергії вітру в електричну	72
4.2 Постановка задачі мікропроцесорної реалізації системи автоматичного керування вітровим електротехнічним комплексом з вертикальною віссю обертання вітрового колеса	80
4.3 Вибір сенсорів інформативних параметрів регулятора ВЕК	80
4.4 Мікропроцесорна реалізація системи автоматичного керування вітровим електротехнічним комплексом з вертикальною віссю обертання вітрового колеса	82
4.5 Комп'ютерне моделювання якості роботи системи керування і дослідження її на стійкість	87
4.6 Оцінка похибок вимірювальних каналів інформативних параметрів	102
4.7 Постановка експерименту з визначення функції максимумів потужностей вітрової турбіни та його результати	104
ВИСНОВКИ	107
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	109

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

- АГ – асинхронний генератор
- АСГ – асинхронізований синхронний генератор
- АЦП – аналогово-цифровий перетворювач
- БПЧ – безпосередній перетворювач частоти
- ВД – вітровий двигун
- ВЕК – вітровий електротехнічний комплекс
- ВЕУ – вітрова електрична установка
- ВМП – відбір максимальної потужності
- ІВМ – інвертор ведений мережею
- НВК – надсинхронний вентильний каскад
- СГ – синхронний генератор
- РРТ – power point tracking

ВСТУП

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 поновлюваних її джерел, особливо енергії вітру, яка у вітрових електричних установках перетворюється в електричну [1, 2, 3, 4, 5]

Головними перевагами ВЕУ є їх енергетична невичерпність, поновлюваність та екологічність. До недавнього часу, зокрема до середини 90-х років ХХ століття, вітрова електроенергетика розвивалася незначними темпами і не знаходила державної підтримки. Це було пов'язано з тим, що органічні види палива мали відносно невелику ціну, а самі вітрові електроустановки були значно дорожчими за інші, традиційні види електроустановок. З розвитком науки і техніки вартість ВЕУ знижувалася, а вартість інших електроустановок росла за рахунок подорожчання палива. Також низка країн зробили більш жорсткими екологічні вимоги до енергоустановок, що в свою чергу вирівнює їх вартість із вартістю ВЕУ [6].

Враховуючи значні переваги вітроенергетики, зокрема для екологічної ситуації і навколишнього середовища, низка країн світу створили на її підтримку офіційні державні програми. Метою цих програм є стимулювання наукових досліджень і практичних кроків до освоєння і використання вітрового потенціалу, зокрема за рахунок державних дотацій і «зеленого тарифу». Це дає змогу розвивати можливості вітроенергетики поряд з іншими джерелами енергії [7].

Станом на сьогодні найбільш ефективно використовується енергія вітру у США, Данії, Німеччині, Австралії та Нідерландах, де вітроелектростанції (ВЕС) використовуються як в якості автономних джерел енергії на розташованих далеко від міст і сіл хуторах і фермах, так і в якості досить потужних електростанцій, під'єднаних до загальної електричної мережі.

В Україні теж уже збудовано низка вітрових електроустановок в Криму та на узбережжі Азовського моря. Але ці вітрові електростанції, незважаючи на їхню помітну потужність, і по-сьогодні працюють

у вузькому діапазоні зміни швидкості вітру, оскільки системи автоматичного керування ними не в змозі забезпечити стабільність частоти струму, що генерується, тобто, ці системи керування не в змозі забезпечити стабільність кутової швидкості обертання вітрових коліс при поривчастому характері вітрового навантаження, оскільки основним способом стабілізації кутової швидкості вітрового колеса ВЕУ є зміна кутів нахилу його лопатей в залежності від потужності вітрового потоку, а такий спосіб є недосконалим, він зменшує коефіцієнт використання вітрової енергії ВЕУ від максимально можливого, ускладнює конструкцію вітрового колеса та суттєво ускладнює систему керування. Крім того, в основному існуючі теоретичні розробки і практика використання стосується саме пропелерних установок, а ВЕУ із вертикальною віссю обертання дослідженні набагато менше, хоча вони мають низку своїх переваг при використанні в специфічних умовах. Тому актуальною є задача розробки такого способу та системи керування ВЕУ, які б забезпечували її роботу 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'язання цієї важливої як у науковому, так і у практичному плані задачі стосовно ВЕУ з вертикальною віссю обертання і розглядається в монографії.

Під вітровим електротехнічним комплексом будемо розуміти сукупність безредукторної вітрової електричної установки (у якій електричний генератор та вітрове колесо суміщено в єдину конструкцію) та системи керування нею. Тобто це не типова ВЕУ з генератором, мультиплікатором тощо, а окремий специфічний комплекс.

Оскільки вітрові колеса виготовляються з горизонтальною і вертикальною віссю обертання, то слід розрізняти і вітрові електротехнічні комплекси з горизонтальною і вертикальною осями.

У монографії розглядаються лише ВЕК з вертикальною віссю обертання вітрового колеса, тобто лише такі ВЕК є об'єктом дослідження, важливими науковими задачами для яких є побудова математичних моделей вітрового навантаження на лопатях вітрових коліс, моделей залежностей кутів нахилу лопатей від вітрового навантажен-

ня, розробка конструкції безредукторної ВЕК із вертикальною віссю обертання, синтез структури пристроїв, які забезпечують роботу ВЕК із оптимальною кутовою швидкістю обертання ВК, на якій відбирається від ВЕК максимум потужності, реалізація розроблених пристроїв в сучасній елементній базі, розробка алгоритмів функціонування цих пристроїв в структурі системи автоматичного керування ВЕУ та оцінка адекватності синтезованих моделей і похибок реалізації заданих законів керування.

В монографії представлені матеріали досліджень, виконані О. А. Жуковим під час роботи над кандидатською дисертацією під науковим керівництвом Б. І. Мокіна, та матеріали досліджень, отримані при виконанні держбюджетної науково-дослідної теми, відповідальним виконавцем якої був О. Б. Мокін.

Автори дякують інженеру кафедри відновлювальної енергетики та транспортних електричних систем та комплексів В. В. Горенюку за виконання низки інженерних розрахунків безредукторного електромеханічного перетворювача енергії вітру в електричну та практичну реалізацію його конструкції.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ КОНСТРУКЦІЙ І СТРУКТУР ВЕУ ТА ЇХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ

1.1 Характеристика вітрових коліс ВЕУ

Знайомство з науковими публікаціями приведеними в списку літератури, зокрема із публікаціями [1–50], дозволяє охопити увесь комплекс питань, що виникають в галузі вітроенергетики, та оцінити досягнуті результати. Із цих публікацій випливає, що ключовими технічними задачами, які потребують розв'язання і передують побудові вітрової електричної установки (ВЕУ), є задача вибору вітрового двигуна та задача вибору електричного генератора, оскільки задача синтезу системи регулювання комплексу «вітровий двигунно-електричний генератор» є похідною від перших двох.

Як відомо, у вітрових двигунів є дві основні класифікаційні ознаки: по-перше, у горизонтальній чи у вертикальній площині лежить вісь обертання ротора його вітрового колеса, а по-друге, непорушно прикріплені лопаті вітрового колеса до основи, чи у них є можливість повертатись відносно площини його обертання на певний кут.

Як з'ясувалось при ознайомленні з науковими роботами – в сучасному парку вітрових електричних станцій використовуються як вертикально осьові вітроелектричні станції, так і горизонтально осьові ВЕУ [1, 2], при чому більшість впроваджених в експлуатацію варіантів побудови ВЕУ мають вітрові двигуни з горизонтальною віссю обертання ротора вітрового колеса. Більше того, значна кількість авторів стверджують, що такий варіант вітрового двигуна має більшу перспективу і уникають можливості використання вітрових двигунів з вертикальною віссю обертання ротора вітрового колеса. Але з цим твердженням, яке, фактично, уже набуло статусу постулату, не можна погоджуватись, виходячи із низки міркувань, які наведено нижче.

Передача потужності у горизонтальноосьових вітрових електростанціях відбувається від вітроколеса до генератора через редуктор (мультиплікатор) на генератор. У таких установках є необхідність орієнтації на вітер та створення складної системи керування для цього,

складність конструкції лопаті (необхідне її скручування), складність обслуговування генератора, розміщеного у гондолі. Крім того, у таких установках необхідними елементами є механізм повороту лопатей та система керування ним. Також необхідно мати у структурі систему керування орієнтацією вітрового колеса на вітер. Така складна механічна система має недостатньо високу надійність, вимагає постійного технічного обслуговування, знижує строк роботи вітроустановки [51, 52].

Цих недоліків позбавлені ВЕУ з вертикальною віссю обертання. Такі ВЕУ можна використовувати без механічного регулювання кутів нахилу лопатей, вони не потребують штормового захисту, мають більш безпечну та надійну конструкцію, не потребують системи орієнтації на вітер, спрощується механічна трансмісія.

Крім того, є надзвичайно багато місць на Землі, в яких є сенс будувати системні ВЕУ з вітровими двигунами саме з вертикальною віссю обертання ротора вітрового колеса.

Так, дійсно, коли мова йде про встановлення ВЕУ на рівнинних морських берегах чи на степовому просторі, то перевагу мають вітрові двигуни з горизонтальною віссю обертання ротора, підняті на якомога більшу висоту, оскільки, як відомо, чим вищою є точка над рівнинною поверхнею, тим з більшою швидкістю у ній дме вітер. Але, якщо мова йде про вузький гірський каньйон, на дні якого тече гірський потік, або про гірську ущелину, утворену на певній висоті на стику двох стін сусідніх гірських піків (рис. 1), то перевага вітрових двигунів з вертикальною віссю обертання ротора стає очевидною. А саме у місяцях гірських ущелин чи звужень, стінки яких утворюють направлені сопла, вітрової енергії ВЕУ з вертикальною віссю обертання буде відбитись більше.

Основний недолік, на який вказують критики, при використанні вітрових коліс з вертикальною віссю обертання ротора – виникнення значних згинальних моментів у нижній частині осі, закріпленій в опорному підшипнику, що веде до значного збільшення його габаритів, а також довгі троси, якими фіксується верхня частина осі, що нависають над значними земельними ділянками і самі є причиною виникнення коливальних процесів. При встановленні таких вітрових коліс у каньйонах та в ущелинах цей недолік повністю усувається за рахунок

жорсткого закріплення верхніх обойм нижнього і верхнього підшипників осі у металевих конструкціях, жорстко прикріплених до металевих балок, защемлених в скальних породах.

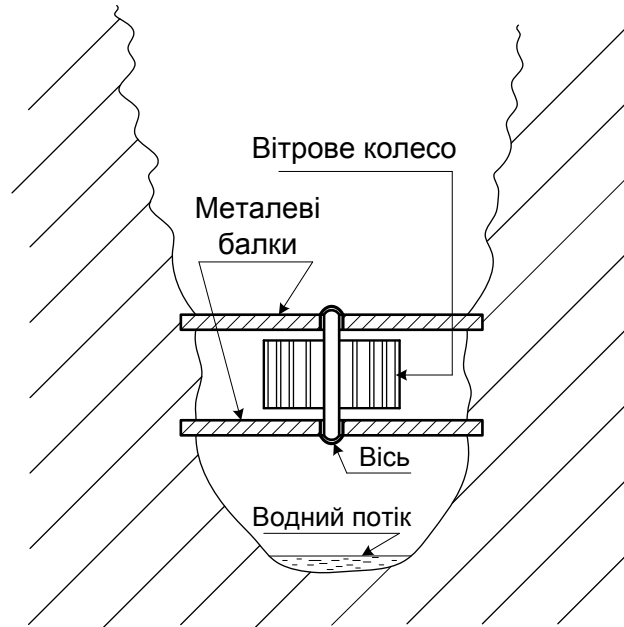


Рисунок 1 – Схематичне зображення в перерізі вітрового колеса з вертикальною віссю обертання ротора, яке може бути встановлене у гірському каньйоні чи у гірській ущелині

Міркування, викладені вище, опубліковані в роботі [53].

Якість роботи ВЕУ та їх ефективність значною мірою залежить від принципів керування ними, тому значну увагу слід приділяти розробці нових та вдосконаленню діючих систем керування.

Виходячи із змальованої вище перспективи, необхідно розвивати дослідження процесів у ВЕУ з вертикальною віссю обертання ротора вітрового двигуна з такою ж інтенсивністю, яка сьогодні має місце по відношенню до ВЕУ, що використовують вітрові двигуни з горизонтальною віссю обертання ротора.

Варто наголосити на тому, що при значних потужностях ВЕС вітрове колесо доведеться встановлювати не між двома металевими балками, як показано на рис. 1, а у сталевому каркасі у вигляді прямокутного паралелепіпеда, жорстко закріпленого між чотирма металевими балками, розміщеними паралельно по дві у горизонтальних площинах

на певній вертикальній відстані одна від одної (рисунка не наводимо, оскільки висловлену сентенцію не важко уявити). Ці балки при комплексному виконанні можуть використовуватись також, як основа пішохідних переходів через гірські ущелини, по дну яких течуть гірські потоки води.

1.2. Характеристика структур ВЕУ

У даний час для ВЕУ найбільш поширеними є асинхронні генератори із короткозамкнутим ротором. Якщо асинхронний двигун приводиться в рух із частотою більшою, ніж синхронна частота, то він буде працювати в режимі генератора, а тому, як правило, для ВЕУ використовуються серійні асинхронні двигуни [51, 54, 55].

АГ підключається до мережі безпосередньо (рис. 2). До тих пір, поки частота обертання ротора машини перевищує синхронну частоту, вона віддає в мережу електроенергію із частотою, рівною частоті мережі. Використання АГ із КЗ ротором дозволяє економити на додаткових системах керування, оскільки в разі використання асинхронної машини допускається менш точне підтримання частоти обертання ВК, а також АГ легше входить у синхронізм із мережею [51].

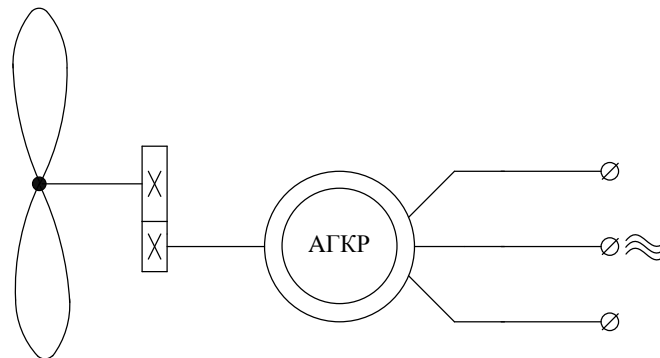


Рисунок 2 – Схема підключення ВЕУ із використанням АГ з КЗ ротором

Іншим варіантом використання для ВЕУ АГ з КЗ ротором є схема із використанням безпосереднього перетворювача частоти. Така система, що зображена на рис. 3, має більші можливості щодо генерації і покращення низки показників, оскільки дозволяє використовувати АГ в режимі генератора і на досинхронних обертах [54, 55, 56].

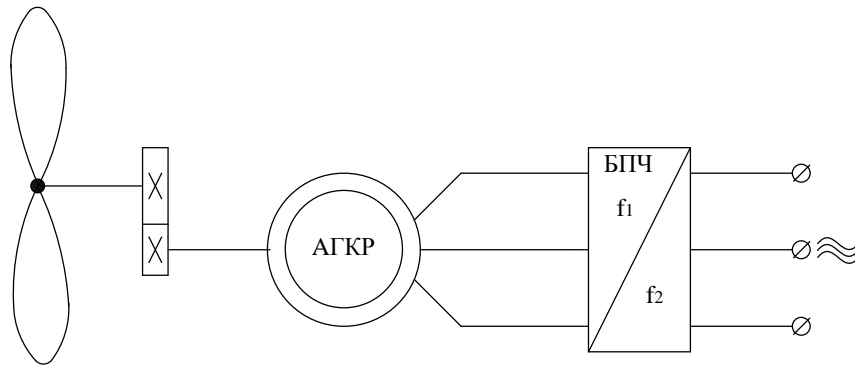


Рисунок 3 – Схема підключення ВЕУ із використанням АГ з КЗ ротором і безпосереднього перетворювача частоти

Однак використання для ВЕУ асинхронної машини має низку недоліків [51, 54], а саме: при одному і тому ж вітровому режимі вона виробляє менше енергії ніж синхронна машина; вона працює з меншим коефіцієнтом потужності, обумовленим значними струмами намагнічення, які пропорційні квадрату напруги; вона споживає реактивну потужність індуктивного характеру із мережі, що вимагає використання компенсуючих пристроїв; у неї обмежена можливість керування швидкістю обертання ротора генератора, що зводиться до аеродинамічного керування ВК або керування за допомогою зміни передаточного числа мультиплікатора, внаслідок чого додатково знижується ККД ВЕУ.

Іншим варіантом електромеханічного перетворювача для ВЕУ є використання синхронного генератора. Найбільш проста схема, що зображена на рис. 4, включає в себе синхронний генератор, що працює паралельно з енергосистемою [51].

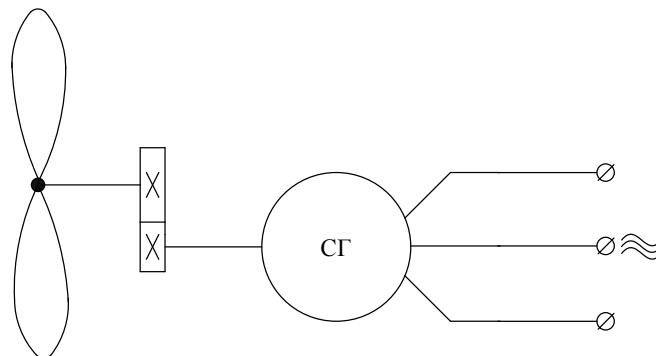


Рисунок 4 – Схема підключення ВЕУ із безпосереднім підключенням СГ до мережі

Оскільки, зазвичай, потужність енергосистеми набагато більша потужності ВЕУ, електрична машина буде знаходитися в синхронізмі в широкому діапазоні зміни потужності, що розвивається ВД. Перевагою СГ є можливість генерації та регулювання як активної, так і реактивної потужностей, а також можливість регулювання напруги статора [54, 55]. Недоліки застосування синхронної машини із безпосередньою роботою на енергосистему, полягають у тому, що при певних вітрових умовах вона може переходити на роботу в режим двигуна і споживати енергію із енергосистеми, машина здатна до коливань при паралельній роботі з іншими агрегатами, а при різких поривах вітру з'являється велика імовірність випадання її із синхронізму. Наступна ж синхронізація машини і підключення її до енергосистеми є складним процесом [51, 55].

Значною мірою цих недоліків ВЕУ позбавляється при застосуванні безпосереднього перетворювача частоти, включеного між СГ та енергетичною системою, як показано на рис. 5.

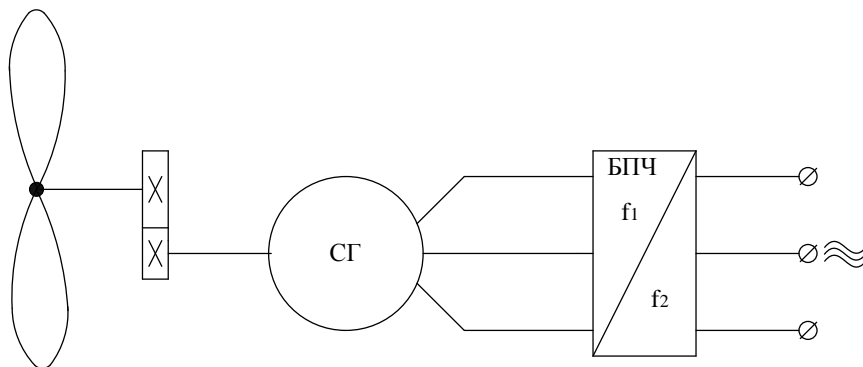


Рисунок 5 – Схема підключення СГ ВЕУ до мережі із застосуванням безпосереднього перетворювача частоти

Але така система має обмеження в керуванні ВЕУ, зокрема в керуванні її швидкістю обертання і моментом ВК. І, звичайно ж, недоліком є застосування мультиплікатора, що узгоджує частоту обертання ВК із генератором.

Суттєво кращі регульовальні можливості мають ВЕУ із застосуванням синхронного генератора і перетворювача частоти, що складається з кількох ланок.

Одним із таких варіантів структури є ВЕУ на основі синхронних генераторів із використанням додаткових перетворювачів [57, 58]. Статор синхронного генератора має трифазну обмотку, а на роторі може знаходитися обмотка збудження або постійні магніти. На рис. 6 показана типова структура ВЕУ із синхронним генератором з обмоткою збудження. До мережі така установка підключена через силовий перетворювач частоти. Така система дозволяє контролювати коефіцієнт потужності і є ефективною за рахунок використання сучасних перетворювачів частоти із високим ККД.

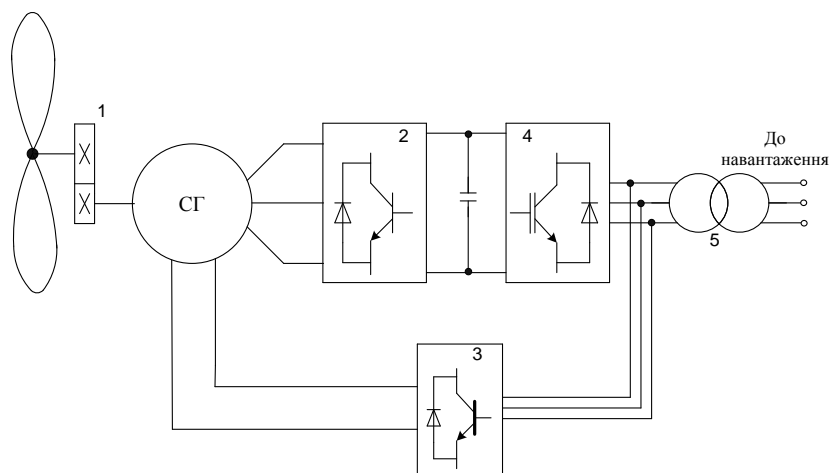


Рисунок 6 – Конфігурація вітрової енергетичної установки із використанням синхронного генератора [57, 58]

На рисунку вітряне колесо підключене до редуктора (варіатора) 1, синхронний генератор СГ приєднаний до мережі через два випрямлячі 2, 3, які працюють на основі широтно-імпульсної модуляції. Випрямляч 2 підключено до обмотки статора, він випрямляє напругу для інвертора 4, що через трансформатор 5 передає напругу у мережу, і може регулювати момент генератора. Випрямляч 3 живить обмотку збудження синхронного генератора.

Однак, така система потребує використання редуктора, що знижує ККД системи та синхронного генератора, розміри якого можуть бути досить значними, тобто така система є громіздкою [58].

На рис. 7 показано варіант підключення ВЕУ через редуктор 1 до мережі із використанням синхронного генератора зі збудженням на

постійних магнітах. Перевагою такого варіанта є простота конструкції і відсутність контактних кілець. Обмотка статора генератора підключена до мережі через діодний випрямляч 2, ШІМ-перетворювач 3 та інвертор 4. Діодний випрямляч випрямляє змінну напругу, зняту із статора генератора, ШІМ-перетворювач служить для регулювання потужності від ВК. Інвертор перетворює постійну напругу у змінну і віддає її у мережу [57, 59].

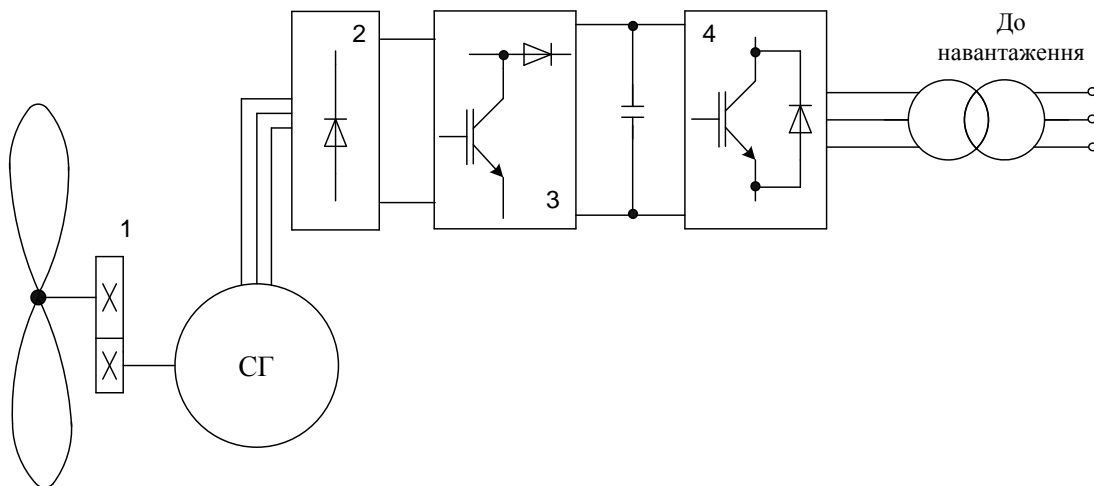


Рисунок 7 – Структура системи ВЕУ із використанням синхронного генератора зі збудженням на постійних магнітах

Недоліком цієї системи, як і попередньої є використання редуктора для підвищення частоти обертання вала, що необхідно для синхронного генератора. Наявність редуктора спричиняє зменшення ККД ВЕУ. Постійні магніти в синхронному генераторі є дорогими і можуть втрачати магнітні властивості. Сам генератор має значні масогабаритні показники і придатний лише для установок невеликої потужності. Відсутня можливість прямого регулювання вихідної напруги.

В літературі [51, 54, 60] здійснюється аналіз застосування у ВЕУ асинхронних генераторів із подвійним живленням, в якості яких можуть застосовуватися асинхронні двигуни з фазним ротором.

Головна перевага асинхронного генератора з фазним ротором полягає в тому, що напруга на його виході має незмінну частоту при зміні частоти обертання ротора в деяких межах.

Існують два варіанти схем із використанням генератора подвійного живлення – схема асинхронізованого синхронного генератора (АСГ) та надсинхронного вентильного каскаду (НВК) [54, 55].

На рис. 8 показано схему асинхронізованого синхронного генератора із використанням в обмотці ротора безпосереднього перетворювача частоти (БПЧ), а обмотка статора напряму підключається до енергетичної системи [54, 60].

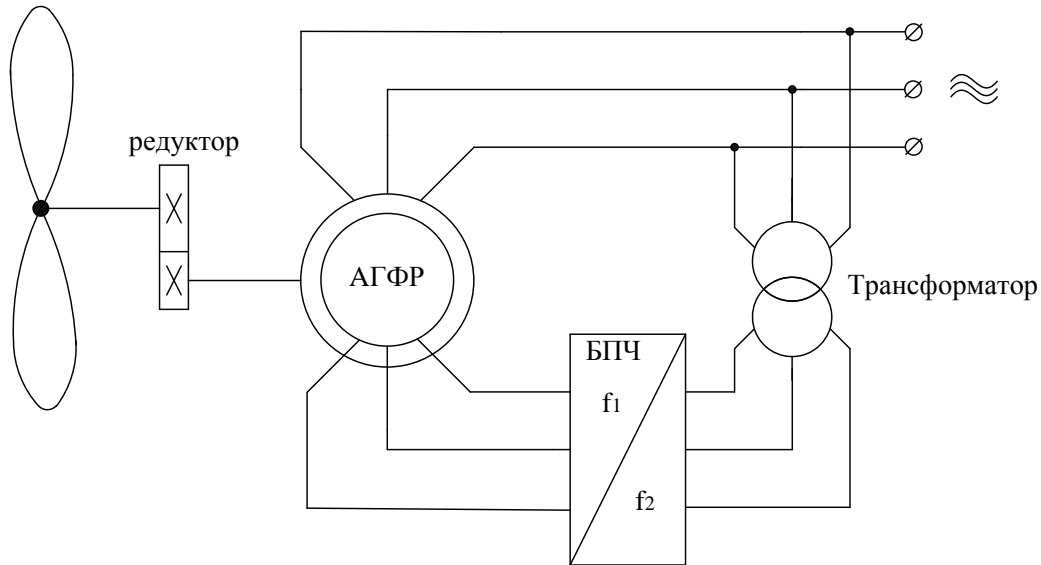


Рисунок 8 – Схема ВЕУ на базі асинхронізованого синхронного генератора із живленням ротора через перетворювач частоти

ВЕУ на основі асинхронізованого синхронного генератора може працювати як в надсинхронному, так і в підсинхронному режимах [54, 61]. Для того, щоб отримати економічно визначену потужність, діаметр цих машин має бути достатньо великим [51], тобто, використання у ВЕУ серійних АД з фазним ротором обмежене. Крім того, серійна асинхронна машина працюватиме в режимах, далеких від номінального, що є небажаним.

На рис. 9 показано спрощену схему ВЕУ із використанням надсинхронного вентильного каскаду. Обмотка статора приєднується до енергетичної системи, а обмотка ротора підключена до входу трифазного випрямляча, який з'єднано з інвертором, що ведений мережею (ІВМ) [54, 61].

Потужність в такому випадку знімається зі статора і з ротора, що збільшує коефіцієнт використання машини, а також розширює можливості керування.

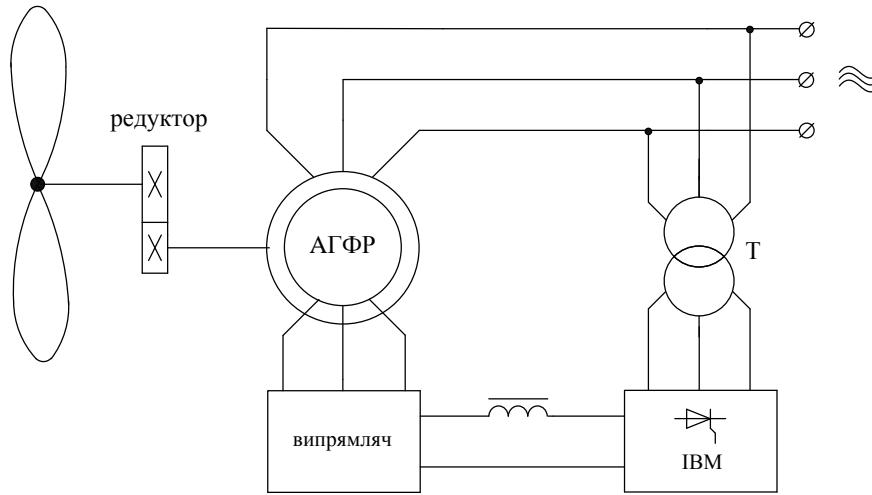


Рисунок 9 – Схема ВЕУ із використанням НВК

Недоліком такої системи, крім перерахованих для асинхронізованого синхронного генератора, є також те, що генерування активної потужності можливе лише при надсинхронній швидкості обертання, підсинхронний режим неможливий, оскільки випрямляч в колі ротора може пропускати активну потужність лише від роторної обмотки на перетворювач частоти, а не навпаки [54, 62].

1.3 Аналіз безредукторних вітрових електричних установок

Виходячи з аналізу структур ВЕУ, наведених у п. 1.1 бачимо, що майже всі структури містять у своєму складі мультиплікатор (або редуктор), який необхідний для працездатності серійних, часто високооборотних генераторів. Мультиплікатор (редуктор) знижує загальний ККД системи і є небажаною ланкою. Крім того, в усіх розглянутих вище варіантах, використовуються серійні генератори для роботи спільно з вітроколесом, які займають окрему просторову зону і часто працюють за межами номінального режиму, що негативно відображається на їх стані.

Тому особливої уваги заслуговує аналіз стану розробки і використання спеціальних тихохідних генераторів, спроектованих для ВЕУ,

які мають специфічну будову і часто мають разом із ВК єдину конструкцію. А ВЕУ в такому випадку є безредукторним електромеханічним перетворювачем.

Відомий безредукторний вітроагрегат (рис. 10) [63], що містить вітроколесо 1 і магнітоелектричний генератор, ротор якого закріплений на торцевій площині вітроколеса і виконаний у формі сталевго кільця 2 з розташованими на ньому постійними магнітами 3. Статор закріплений на окремій опорі і складається з окремих шихтованих секцій трапецієподібного перерізу 4, з'єднаних між собою фланцями. На кожній секції розміщено обмотку 5. Магнітопроводи в цій конструкції мають кільцеву форму і на роторі і на статорі. Тому контур проводки магнітного потоку від кожної пари діаметрально розміщених магнітів має не радіальну, а кругову симетрію.

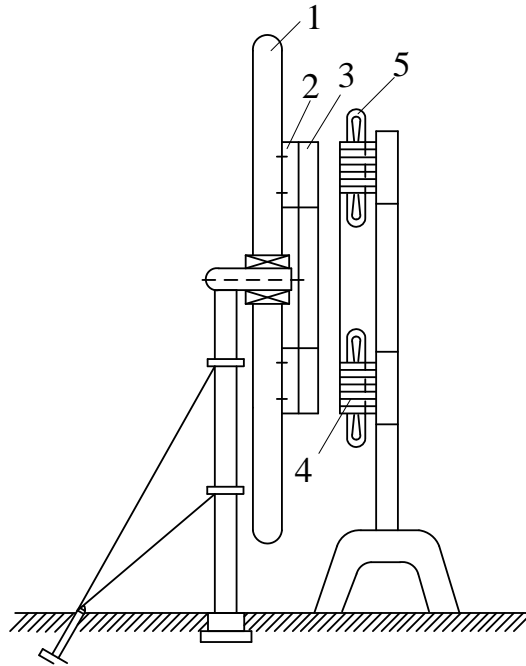


Рисунок 10 – Конструкція безредукторного вітроагрегату з горизонтальною віссю обертання і з ротором на торцевій площині вітроколеса

Така конструкція вітроагрегату дозволяє знімати з нього високу потужність при заданих габаритах, а за рахунок великої довжини вітроколеса покращуються умови тепловіддачі та вентиляції генератора.

Недоліками такого вітроагрегату є складність конструкції і завищена вага ротора, що надмірно збільшує інерційний момент вітроколеса і створює великі механічні навантаження на опорну систему; ви-

користання постійних магнітів, що унеможлиблює керування струмом збудження; залежність від напрямку вітру, що передбачає використання додаткової системи орієнтації на вітер.

Інший варіант конструкції без редукторної ВЕУ розглядається у роботі [64]. На рис. 11 показано, що безредукторна ВЕУ містить вітроколесо з горизонтальною віссю і з лопатями 1, ступицею 2, рухоми поворотну основу 3, що встановлена на башті 4, і хвостовий елемент 5. Статор 6 встановлений під основою і періодично входить у магнітний контакт із роторними елементами, що закріплені на лопатях вітроколеса. В результаті чого в котушках статора буде наводитися електрорушійна сила.

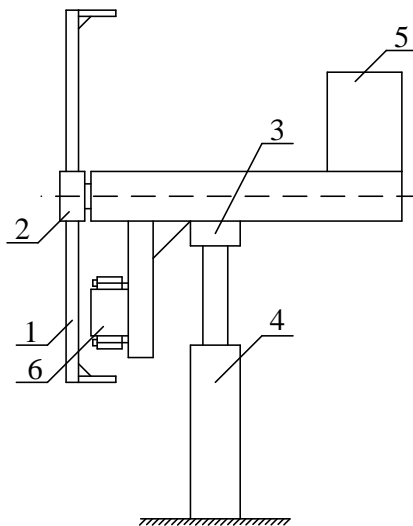


Рисунок 11 – Безредукторний вітроагрегат з горизонтальною віссю обертання і з ротором, на кінцях лопатей

Недоліками такої ВЕУ є збільшений пусковий момент, що обумовлений радіальними силами стягування роторного елемента до статорного; залежність від напрямку вітру, що вимагає додаткової системи керування; для забезпечення генерування енергії неперервно в часі без провалів напруги потрібна досить висока швидкість вітру, що не може бути постійним з природних умов, або роторні елементи мають знаходитися поряд один із одним, а такий варіант можливий при збільшенні числа лопатей вітрового колеса (оптимальним є 3 лопаті [52]), що може спричинити до зменшення частоти обертання ротора відносно статора за рахунок більшого аеродинамічного опору. Як варіант – можливе виконання обода по колу лопатей, що збільшить масогабари-

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Держкий В. Г. Аналитический прогноз развития мировой ветроэнергетики / В. Г. Держкий // Энергетика и электрификация. – 2000. – № 1. – С. 53–56.

2. Зміни та доповнення до комплексної програми будівництва вітрових електростанцій // МКР з питань будівництва вітрових електростанцій. – 2000. – 109 с.

3. Подгуренко В. С. Анализ развития ветроэнергетики в Украине / В. С. Подгуренко // Энергетика и электрификация. – 2000. – № 2. – С. 40–51.

4. Харитонов В. П. Ветроэнергетические ресурсы, состояние и перспективы использования энергии ветра / В. П. Харитонов // Энергетическое строительство. – 1991. – № 3. – С. 20–24.

5. Шихайлов Н. А. Развитие ветроэнергетики в Украине / Н. А. Шихайлов // Нетрадиционные источники, передающие системы и преобразователи энергии : сборник науч. статей : в 2 ч. – Харьков. – 1997. – Ч. 1. – С.9–10.

6. Развитие возобновляемых источников энергии в России: возможности и практика (на примере Камчатской области) : сборник. – М. : ОМННО : Совет Гринпис, 2006. – 92 с.

7. Мартиросов С. Развитие ветроэнергетики в мире / Станислав Мартиросов, Валерий Муругов // Возобновляемая энергия. Ежеквартальный информационный бюллетень. – 2000. – № 6. – С. 1–4.

8. Бриль А. О. Особливості функціонування промислових вітроелектричних станцій у складі регіональної електросистеми / А. О. Бриль, В. П. Васько, П. Ф. Васько // Нетрадиционная энергетика в XXI веке : материалы III международной научно-практической конференции: (9–15 сентября 2002 г., Судак). – Киев : ИТТФ НАНУ, 2002. – С. 112–113.

9. Будзяк В. М. Становление ветроэнергетики в Украине / В. М. Будзяк // Энергетика Украины. – 1992. – № 3. – С. 13–17.

10. Васько П. Ф. Питомі характеристики енергетичного потенціалу вітру на території України / П. Ф. Васько // *Енергетика и электрификация*. – 1997. – № 4. – С. 53–55.

11. Васько П. Ф. Системи електромеханічного перетворювання енергії вітру : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра техн. наук : спец. 05.14.08 «Перетворювання відновлюваних видів енергії» / П. Ф. Васько. – Київ, 1998. – 33 с.

12. Васько П. Ф. Определение технических показателей эффективности использования ветроэлектрических агрегатов в Украине / П. Ф. Васько, А. А. Брыль, П. П. Пекур // *Енергетика и электрификация*. – 1995. – № 2. – С. 48–51.

13. Вашкевич К. П. Аэродинамические характеристики ветродвигателей ветроэлектрических установок / К. П. Вашкевич // *Изв. Академии наук России. Энергетика*. – 1997. – № 3. – С. 4–17.

14. Вітроенергетичні установки малої потужності для безперебійного живлення автономних енергоспоживачів // *Пропозиція*. – 2001. – № 10. – 106 с.

15. Васько В. П. Оценка объемов выработки электроэнергии современными ветроустановками в ветровых условиях Крыма / В. П. Васько // *Устойчивый Крым. Энергетическая стратегия XXI века*. – Симферополь : *Экология и мир*. – 2001. – С. 319–325.

16. Ветроэлектрические станции / В. Н. Андрианов, Д. Н. Быстрицкий, К. П. Вашкевич, В. Р. Секторов / под ред. В. Н. Андрианова. – М. : Госэнергоиздат, 1960. – 250 с.

17. ГКД 3.003 – 2000. Вітроенергетика. Вітрові електричні установки. Порядок поставлення на серійне виробництво / А. О. Бриль, В. П. Васько, В. А. Хілько, В. Г. Шульга. – Київ : Державний комітет промислової політики України, 2000. – 31 с.

18. ГКД 341.003.001.002-2000. Правила проектування вітрових електричних станцій / М. М. Жовмір, А. С. Симонов та інші. – Строк перевірки 2004 р. – Київ : Мінпаливенерго України, 2001. – 52 с.

19. Голубенко М. С. Стан розвитку вітроенергетики в Україні / М. С. Голубенко, О. М. Гембарський, М. М. Решетняк // *Енергетика и электрификация*. – 2000. – № 12. – С. 36–37.

20. Голубенко Н. Опыт разработки, создания и экспериментальной отработки ветроэлектрических агрегатов средней мощности в ГКБ «Южное» / Николай Голубенко, Виктор Цыганов // Нетрадиционные источники, передающие системы и преобразователи энергии : сборник научных статей : в 2 ч. – Харьков, 1997. – Ч. 1. – С. 23–24.

21. Энергетика автономных ветроустановок / Г. И. Денисенко, П. Ф. Васько, А. А. Брыль [та ін.] // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1990. – № 3. – С. 130–135.

22. Денисенко Г. И. Проектирование и расчет ветроэлектрических станций : учеб. пособие / Г. И. Денисенко, Л. П. Федосенко, Г. А. Козловский. – Киев : КПИ, 1986. – 64 с.

23. Вітроенергетичні установки та вітроелектричні станції. Терміни та визначення : ДСТУ 3896-99. – Київ : Держстандарт України, 1999. – 21 с.

24. Вітроенергетика. Установки електричні вітрові. Загальні технічні вимоги : ДСТУ 4037-2001. – Київ : Держстандарт України, 2001. – 28 с.

25. Брыль А. О. Энергетична сумісність вітроелектростанцій в складі централізованої електроенергетичної системи / А. О. Брыль, В. П. Васько, П. П. Пекур // Нетрадиционная энергетика в XXI веке : материалы III международной научно-практической конференции: (9–15 сентября 2002 г., Судак). – Киев : ИТТФ НАНУ. – 2002. – С. 113–115.

26. Жовмір М. До питання про доцільність будівництва вітрових електростанцій в Україні / М. Жовмір, С. Шульга // Энергетика и электрификация. – 2000. – № 4. – С. 36–40.

27. Жумабеков К.С. Анализ тенденций развития технических решений в ветроэнергетике / К. С. Жумабеков, Н. С. Барбашинова, Б. О. Буркитбаев // Вестник с.-х. науки Казахстана. – 1990. – № 5. – С. 98–100.

28. Кутін В. Методика розрахунку аеродинамічних характеристик вітродвигуна роторного типу (ВДР) / Василь Кутін, Віктор Горенюк // Вісник Вінницького політехнічного ін-ту. – 1999. – № 2. – С. 57–62.

29. Кравцов В. С. Неисчерпаемая энергия : Кн. 1. Ветрогенераторы ; учебник / В. С. Кравцов, А. М. Олейников, А. И. Яковлев. – Х. : Нац. аэрокосмический ун-т. «Харьк. авиац. ин-т.», 2003. – 400 с.

30. Кудря С. О. Нетрадиційні та поновлювальні джерела енергії в регіоні / С. О. Кудря // Наука і вітроенергетика : матеріали першої міжнародної науково-практичної конференції. – Львів, 2001. – С. 91–95.

31. Кудря С. О. Основные задачи МНТЦ вітроенергетики НАНУ по науково-технічному супроводу комплексної програми будівництва ВЕС в Україні / С. О. Кудря, В. Г. Тучинський // Нетрадиционная энергетика в XXI веке : материалы III международной научно-практической конференции: (9–15 сентября 2002 г., Судак). – Киев : ИТТФ НАНУ. – 2002. – С. 32–36.

32. Кукушкін В.І. Нетрадиційні і поновлювальні джерела енергії як альтернативні первинним джерелам енергії в регіоні / В. І. Кукушкін // Ветроэнергетика сегодня : материалы першої міжнародної науково-практичної конференції. – Львів, 2001. – С. 96–98.

33. Кукушкин В.И. Создание ветроэнергетического направления в промышленности Украины и строительство ветровых электростанций как экологически чистой отрасли промышленности / В. И. Кукушкин // Нетрадиционная энергетика в XXI веке : материалы III международной научно-практической конференции: (9–15 сентября 2002 г., Судак). – Киев : ИТТФ НАНУ. – 2002. – С. 30–32.

34. Васько П. Ф. Питомі характеристики енергетичного потенціалу вітру на території України / П. Ф. Васько // Энергетика и электрификация. – 1997. – № 4. – С. 53–55.

35. Мхитарян Н. М. Энергетика нетрадиционных и возобновляемых источников / Н. М. Мхитарян. – К. : Наукова думка. 1999. – 314 с.

36. Олейников А. М. Автономные ветроэлектродгенераторы малой мощности / А. М. Олейников, А. В. Пильганчук, Л. Л. Загоруйко // Сб. научн. трудов СИЯЭиП. – 1999. – № 1. – С. 77–79.

37. Перфилов О. Некоторые вопросы развития ветроэнергетики / Олег Перфилов, Виктор Шаварин // Энергетическое строительство. – 1991. – № 3. – С. 29–33.

38. Прогнозирование мощностных и моментных характеристик ветроколеса с вертикальной осью вращения и различными аэродинамическими профилями рабочих лопастей / А. И. Яковлев, М. А. Затучная, И. Г. Головчинер [и др.] // Нетрадиционные источники, передающие системы и преобразование энергии. – Харьков. – 1997. – С. 111–115.

39. Подгуренко В. Об ошибочных утверждениях, дискредитирующих ветроэнергетику / Владимир Подгуренко, Виталий Бордюгов // Энергетика и электрификация. – 2000. – № 12. – С. 49–53.

40. Смолінський С. В. Вітряки України / С. В. Смолінський // Ватерпас. – 1999. – № 18/19. – С. 56–61.

41. Сиротюк В. М. Деякі аспекти обґрунтування конструктивних параметрів вітроколів / В. М. Сиротюк, В. Ю. Воробкевич, С. В. Сиротюк // С.-г. машини : зб. ст. – Луцьк. – 1999. – Вип. 5. – С. 246–253.

42. Фатеев В. М. Ветро двигатели и ветроустановки / В. М. Фатеев. – М. : Сельхозиздат, 1957. – 536 с.

43. Фатеев Е. М. Ветро двигатели и ветротурбины / В. М. Фатеев. – М. : Сельхозгиздат, 1957. – 544 с.

44. Шефтер Я. И. Использование энергии ветра / Я. И. Шефтер. – М. : Энергоатомиздат, 1983. – 200 с.

45. Шефтер Я. И. Ветронасосные и ветроэлектрические агрегаты / Я. И. Шефтер, И. В. Рождественский. – К., 1967. – 260 с.

46. Шульга В. Від вітряка до вітроенергетики / В. Шульга, С. Кудря, В. Хілько // Пропозиція. – 1998. – № 11. – С. 50–51.

47. Энергия ветра: оценка технического и экономического потенциала / Л. Ярас, Л. Хоффман, А. Ярас [и др.]; пер. с англ. под ред. Я. И. Шефтера. – М. : Мир, 1982. – 256 с.

48. Яковлев А. И. Энергетические характеристики ветротурбин различного типа / А. И. Яковлев, М. А. Затучная, О. О. Тыхевич // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2000. – Вып.21. – С. 88–91.

49. Яковлев А. Энергетические характеристики ветротурбин с вертикальной осью вращения / Александр Яковлев, Мария Затучная // Авиационно-космическая техника и технология. – 1998. – Вып. 7. – С. 98–102.

50. Основні параметри енергозабезпечення національної економіки на період до 2020 року / Б. С. Стогній, О. В. Куриленко, А. В. Праховник [та ін.]. – Київ : Інститут електродинаміки НАН України. – 2011. – 275 с.

51. Ветроэнергетика / [под ред. Д. де Рензо]. – М. : Энергоатомиздат, 1982. – 272 с.

52. Денисенко О. Г. Преобразование и использование ветровой энергии / О. Г. Денисенко, Г. А. Козловский, Л. П. Федосенко. – Киев : Техника, 1992. – 176 с.

53. 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.

54. Алексеевский, Д. Г. Электромеханическая система ветроэнергетической установки на базе сверхсинхронного вентильного каскада : автореф. дис. на сосик. науч. степени канд. техн. Наук : спец. 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы» / Д. Г. Алексеевский. – Днепропетровск, 2003. – 19 с.

55. Рогозин А. Сопоставительный анализ условий работы асинхронных и синхронных ветроэлектрических генераторов / Александр Рогозин, Александр Пенегин // Электричество. – 1996. – № 2. – С. 36–43.

56. Carlson O. Variable speed AC - generators applied in WECS / O. Carlson, J/ Hylander, S. Tsilos // EWEC'86. – 1986. – 1. Sec. D, D23 – P. 685–690.

57. Joanne Hui. An Adaptive Control Algorithm for Maximum Power Point Tracking for Wind Energy Conversion Systems / H. Joanne // A thesis submitted to the Department of Electrical and Computer Engineering in conformity with the requirements for the degree of Master of Science (Engineering). – Kingston, Ontario, Canada : Queen's University, 2008. – 83 p.

58. A survey on variable-speed wind turbine system / J. Marques, H. Pinheiro, H. Grundling [an ot.] // Proceedings of Brazilian conference of electronics of power, 2003. – V. 1. – P. 732–738,

59. Muller S. Adjustable speed generators for wind turbines based on doubly-fed induction machines and 4-quadrant igbt converters linked to the

rotor / S. Muller, M. Deicke, R.-W. De Docker // IEEE Industry Applications Conference, vol. 4, pp. 2254–2259, October 2000.

60. Мимокоянц Л. Асинхронизированные синхронные генераторы: состояние, проблемы, перспективы / Леонид Мимокоянц, Юрий Шакарян // Электричество. – 1994. – № 3. – С. 1–8.

61. Онищенко Г. Асинхронные вентильные каскады и двигатели двойного питания / Г. Онищенко, И. Локтева. – М. : Энергия, 1979. – 200 с.

62. Онищенко Г. Электропривод турбомеханизмов / Г. Онищенко, М. Юньков. – М. : Энергия, 1972. – 240 с.

63. А. с. 868105 СССР, МПК7 F03D 9/00. Безредукторный ветроагрегат / И. П. Копылов, Т. В. Лядова (СССР) ; опубл. 30.09.81, Бюл. № 36.

64. Пат. 2270362 Российская Федерация, МПК F03D7/02. Статор ветроэлектрогенератора / Литвиненко А. М. ; заявитель и патентообладатель Воронежский государственный технический ун-т ; опубл. 27.09.2004.

65. Пат. 2261366 Российская Федерация, МПК F03D7/02. Безредукторный ветроагрегат / Литвиненко А. М. ; заявитель и патентообладатель Воронежский государственный технический ун-т ; опубл. 25.02.2004.

66. Пат. 2383777 Российская Федерация, МПК F03D7/02 . Безредукторный ветроагрегат / Литвиненко А.М. ; заявитель и патентообладатель Воронежский государственный технический ун-т ; опубл. 10.03.2010.

67. Пат. 2390653 Российская Федерация, МПК F03D3/00. Безредукторный ветроэлектроагрегат / Литвиненко А.М. ; заявитель и патентообладатель Воронежский государственный техн. ун-т. – № 2008143885/06 ; заявл. 05.11.2008 ; опубл. 27.05.2010.

68. А. с 861715 СССР МПК7 F03D 1/00 Безредукторный ветроагрегат / И. П. Копылов, Т. В. Лядова (СССР) ; опубл.07.09.81, Бюл. № 33.

69. А. с. 861716 СССР, МКК 7 F03D 1/00. Безредукторный ветроагрегат / И. П. Копылов, Т. В. Лядова (СССР) ; опубл. 1981, Бюл. № 11.

70. А. с. 969948 СССР МПК7 F03D 1/00 Безредукторный ветроагрегат / И. П. Копылов, Т. В. Лядова (СССР) ; опубл. 01.11.82, Бюл. № 36

71. Пат. 86457 Україна МПК F03D5/00, F03D3/00 Безредукторний вертикальноосьовий вітроагрегат / Буряк О. А., Дзензерський В. О., Тарасов С. В. [та ін.]; заявник та патентоутримувач Ін-т транспортних систем і технологій НАНУ. – № а200705333 ; заявл. 25.11.2008 ; опубл. 27.04.2009, Бюл. № 8

72. Sandra Eriksson. Direct Driven Generators for Vertical Axis Wind Turbines / Sandra E. // 2008 Acta Universitatis Upsaliensis. Digital Comprehensive Summaries of Uppsala Dissertations from the Faculty of Science and Technology 547. 88 pp. Uppsala.

73. Sreedhar R. G. Modeling and power management of a hybrid windmicroturbine power generation system. / R. G. Sreedhar // 2005 Montana State University. A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Electrical Engineering. 154 pp. Bozeman, Montana.

74. Fabiano D. A. Maximum power point tracker for small wind turbines including harmonic mitigation. / D. A. Fabiano, J. A. Villar Ale, F. S. Reis // 2006 Pontifical Catholic University of Rio Grande do Sul – PUCRS. European Wind Energy Conference & Exhibition. 10 pp. Porto Alegre, RS – Brazil

75. Yanto H. A. Modeling and control of household-size vertical axis wind turbine and electric power generation system / H. A. Yanto, T. L. Chun, C. H. Jonq. // 2009 National Taiwan University of Science and Technology. 7 pp. Taipei, Taiwan.

76. Щур І. З. Багатофункціональне керування активним випрямлячем в локальній вітроенергетичній системі з вертикальною віссю обертання / І. З. Щур, О. Р. Турленко // Вестник Нац. ун-та «Харьковский политехнический институт»: Проблемы автоматизированного элек-

тропривода. Теория и практика. – Харьков, 2008. – Вып. 30. – С. 418–420.

77. Тихевич О. О. Удосконалення методики узгодження параметрів вітротурбіни та асинхронізованого синхронного генератора вітроенергетичної установки : автореф. дис. на здобуття наук ступеня канд. техн. наук : спец. 05.14.08 «Перетворювання відновлюваних видів енергії». – Київ, 2003. – 19 с.

78. Moor G. Power point trackers for wind turbines / G. Moor, H. Beukes // Power Electronics Specialist Conference (PESC), pp. 2044–2049, 2004.

79. Optimum control of ipmsg for wind generation system / T. Nakamura, S. Morimoto, M. Sanada and Y. Takeda // Power Conversion Conference (PCC). – 2002. – V. 3. – P. 1435–1440,

80. Wang Q. An intelligent maximum power extraction algorithm for inverter-based variable speed wind turbine systems / Q. Wang, L. C. Chang // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2004. – V. 19. – P. 1242–1249.

81. Koutroulis E. Design of a maximum power tracking system for wind-energy-conversion applications / E. Koutroulis, K. Kalaitzakis // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2006. – V. 53.

82. Datta R. A method of tracking the peak power points for a variable speed wind energy conversion system / R. Datta, V. T. Ranganathan // IEEE Transactions on Energy Conversion. – 2003. – V. 18. – P. 163–168.

83. Роторні (ортогональні) вітроустановки: матеріали виробничо-комерційного підприємства «Махаон» [Електронний ресурс]. 2005 р. Режим доступу: <http://mahaon-energy.ru/rotornaуa>.

84. Глась М. И. О целесообразности создания вертикальноосевых ветроэлектрических установок мегаватного класса / М. И. Глась, Ю. П. Дымковец, Н. А. Акаев // Энергетическое строительство. –1999. – № 3. – С. 33–37.

85. Мхитарян А. М. Аэродинамика / А. М. Мхитарян. – М. : Машиностроение, 1970. – 428 с.

86. Васько В. П. Керування нестаціонарними режимами роботи вітроустановок промислових вітроелектричних станцій : дис. ... канд. тех. наук : 05.14.08 / Васько Віктор Петрович. – К., 182 с.

87. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники / Л. А. Бессонов. – М. : Высшая школа, 1978. – 528 с.

88. 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 // Наукові праці Вінницького національного технічного університету : електронне науково-спеціалізоване видання. – 2008. – Вип. 2. – Розділ: Енергетика і електротехніка. – Режим доступу до журн.: <http://www.nbu.gov.ua/e-journals/vntu/2008-2/2008-2.htm>.

89. 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 // Наукові праці Вінницького національного технічного університету : електронне науково-спеціалізоване видання. – 2008. – Вип. 3. – Розділ: Енергетика і електротехніка. – Режим доступу до журн.: <http://www.nbu.gov.ua/e-journals/vntu/2008-3/2008-3.htm>.

90. Мокін Б. І. Ідентифікація параметрів моделей та оптимізація режимів системи електропривода трамвая з тяговими електродвигунами постійного струму : монографія / Б. І. Мокін, О. Б. Мокін. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008. – 92 с.

91. Мокин Б. И. Автоматические регуляторы в электрических сетях / Б. И. Мокин, Ю. Ф. Выговский. – К. : Техника, 1985. – 104 с.

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

93. Манусов В. З. Применение нечеткой логики для согласования режимов работы ветроэнергетической установки с графиком электрической нагрузки / В. З. Манусов, А. В. Седелников // Известия Томского политехнического университета. – 2005. – Вып. 5. – С. 161–164

94. Симанков В. С. Методология нечеткого управления автономной фотоветроэнергетической системой / В. С. Симанков, А. В. Шопин, П. Ю. Буцацкий // Труды ФОРА. – 1999. – Вып. 4. – С. 71–77.

95. Український гідрометеорологічний центр [Електронний ресурс]. Режим доступу: www.meteo.com.ua

96. Гостев В. И. Синтез нечетких регуляторов систем автоматического управления / В. И. Гостев. – К. : Радиоаматор, 2005. – 708 с

97. Кір'янов Д. В. Модель системи автоматичного керування підйомом антенної щогли в умовах дії вітрових навантажень / Д. В. Кір'янов // Системи озброєння і військова техніка. – Харків, 2009. – Вип 4(20). – С. 115–119.

98. Кирьянов Д. В. Методика параметрического синтеза цифрового нечеткого регулятора САУ нестационарными объектами управления / Д. В. Кирьянов // Системи обробки інформації. – 2006. – Вип. 5(54). – С. 53–57.

99. Тутубалин В. Н.. Теория вероятностей и случайных процессов : учеб. пособие / В. И. Тутубалин. – М. : Изд-во МГУ, 1992. – 400 с.

100. Буяльская Т. Б. Нечеткие математические модели в задачах экспертизы художественных произведений / Т. Б. Буяльская, Б. И. Мокин, А. Б. Мокин // Автоматика-2000 : праці міжнародної конференції, (11–15 вересня 2000 р., Львів). – Том 2. – С. 43–48.

101. Штовба С. Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB / С. Д. Штовба. – М. : Горячая линия – Телеком, 2007. – 288 с.

102. M68HC11E Familg. Technical Data. – Motorola Inc., 2002. – 336 p. – M68HC11E/D – Rev. 4.7/2002.

103. 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.

104. Митюшкин Ю. И. Soft Computing: идентификация закономерностей нечеткими базами знаний / Ю. И. Митюшкин, Б. И. Мокин, А. П. Ротштейн. – Вінниця : Універсум-Вінниця, 2002. – 145 с.

105. Батищев Д. И. Оптимизация многоэкстремальных функций с помощью генетических алгоритмов / Д. И. Батищев, С. А. Исаев // Высокие технологии в технике, медицине и образовании : межвузовский сборник научных трудов. – Херсон : Институт системных исследований образования, 1996. – С. 105–110.

106. Сабарин Р. В. Модифицированный генетический алгоритм для задач оптимизации и управления / Р. В. Сабарин, Н. И. Смирнов, А. И. Репин // Exponenta Pro. Математика в приложениях. – 2004. – № 3–4. – С. 78–85.

107. Рутковская Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л. Рутковский. – М. : Горячая линия – Телеком, 2006. – 452 с.

108. Штовба С. Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. – М. : Горячая линия – Телеком. – 2007. – 288 с.

109. Леоненков А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH / А. В. Леоненков. – СПб. : БХВ-Петербург, 2005. – 736 с.

110. Голубин А. В. Определение параметров генетического алгоритма с помощью программного комплекса «Gensearch» / А. В. Голубин // Перспективные информационные технологии и интеллектуальные системы. – 2004. – № 3 (19). – С. 42–47.

111. Жуков О. А. Математичні моделі та пристрої для автоматичного керування вітровим електротехнічним комплексом з вертикальною віссю обертання : дис. ... канд. тех. наук : 05.09.03 / Жуков Олександр Анатолійович. – Вінниця : ВНТУ. – 2011 р. – 129 с.

112. Олейников А. М. Инженерная методика оптимизационного расчета тихоходного синхронного генератора с постоянными магнитами / А. М. Олейников, Л. Н. Канов, А. И. Зарицкая // Вестник СевГТУ. – 2008. – № 88. – С. 104 – 107.

113. Пахомин С. А. Проектирование синхронных генераторов: [учеб. пособие к курсовому проекту по электромеханике] / С. А. Пахомин ; Юж.-Рос. гос. техн. ун-т. – Новочеркасск : ЮРГТУ, 2007. – 91 с.

114. Проектирование электрических машин : учеб. пособие для вузов / И. П. Копылов, Б. К. Клоков, В. П. Морозкин [и др.] ; под. ред. И. П. Копылова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1993. – Кн. 2. – 384 с.

115. Звіт про виконання держбюджетної теми «Розробка вітроенергетичних модулів з прямим перетворенням енергії вітру в електроенергію», Номер державної реєстрації № 84-Д-326 / Б. І. Мокін, О. Б. Мокін, В. В. Горенюк, О. А. Жуков, А. І. Соф'янчук, Н. І. Мусійчук. – Вінниця : ВНТУ, 2010. – 51 с.

116. Жуков О. А. Математична модель системи керування електромеханічним комплексом вітроенергетичної установки на базі Fuzzy-контролера / С. М. Бойко, О. А. Жуков, М. А. Щербак, В. І. Сенько // Електромеханічні і енергозберігаючі технології. – 2013. – № 2(22). – Ч. 2. – С. 103–110.

117. Вишняков Н. Г. Применение микропроцессорной техники для регулирования напряжения в электрических сетях / Н. Г. Вишняков, В. И. Кочкин, В. К. Стрюцков // Обз. инф. Сер. Средства и системы управления в энергетике // Информэнерго. – 1990. – № 2. – С. 1–58.

118. Гребнев В.В. Однокристалльные микро-ЭВМ семейства AT89 фирмы Atmel / Гребнев В.В. – СПб. : ЭФО, 1998. – 76 с.

119. Однокристалльные микро-ЭВМ. Семейство МК48 и МК51 / Г. П. Липовецкий, Г. В. Литвинский, О. Н. Оксинь [и др.]. – М. : Бинном, 1992. – 339 с.

120. Чумаченко І. В. Мікроконтролерні прилади: структура і використання : навчальний посібник / І. В. Чумаченко, М. Д. Кошовий, В. В. Лопатин. – Харків : Нац. аерокосмічний ун-т «ХАІ», 2001. – 277 с.

121. Шевкопляс Б. В. Микропроцессорные структуры. Инженерные решения : справочник [2-е изд.] / Б. В. Шевкопляс. – М. : Радио и связь, 1990. – 512 с.

122. Микропроцессоры и микропроцессорные комплекты интегральных микросхем : справочник / Б. Б. Абрайтис, Н. Н. Аверьянов, А. И. Белоус [и др.]. – М. : Радио и связь, 1988. – 368 с.

123. Федорков Б. Г. Микросхемы ЦАП и АЦП: функционирование, параметры, применение / Б. Г. Федорков, В. А. Телец. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 320 с.
124. Аш Ж. Датчики измерительных систем. Кн. 1. / Ж. Аш. – М. : Мир, 1992. – 480 с.
125. Фрайден Дж. Современные датчики : справочник / Дж. Фрайден. – М. : Техносфера, 2005. – 592с.
126. Мікроконтролери фірми Атмел. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.atmel.com/>
127. Голубцов М. С. Микроконтроллеры AVR от простого к сложному / М. С. Голубцов. – М. : СОЛОН-Пресс, 2003. – 288 с.
128. Гребнев В. В. Микроконтроллеры семейства AVR фирмы ATMEL / В. В. Гребнев. – М. : ИП РадиоСофт, 2002. – 176 с.
129. Евстифеев А. В. Микроконтроллеры AVR семейства Classic фирмы Atmel / А. В. Евстифеев. – М. : Додэка-XXI, 2006. – 288 с.
130. К вопросу о точности угловых энкодеров. – М. : Техническое издание отдела преобразователей линейных и угловых перемещений Renishaw plc. – 2005. – 5 с.
131. Воронов А. А. Основы теории автоматического регулирования и управления / А. А. Воронов, В. К. Титов, Б. Н. Новогранов. – М. : Высшая школа, 1977. – 519 с.
132. Жмак Е. И. Регулирование напряжения в электроэнергетических системах на основе нечеткой логики : дис. ... кандидата тех. наук : 05.14.02 / Жмак Егор Иванович. – Н., 2004. – 120 с.
133. Гультяев А. MATLAB 5.2. Имитационное моделирование в среде Windows: практическое пособие / А. Гультяев. – СПб. : Корона Принт, 1999. – 288 с.
134. Потемкин В. Г. Система MATLAB 5 для студентов / В. Г. Потемкин, П. И. Рудаков. – [2-е изд.]. – М. : ДИАЛОГ-МИФИ, 1999. – 448 с.
135. Дьяконов В. П. Simulink 4. Специальный справочник / В. П. Дьяконов. – СПб. : Питер, 2002. – 528 с.

136. Черных И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink / И. В. Черных . – М. : ДМК Пресс, 2008. – 288 с.

137. Абраменко И. Г. Компьютерные технологии в автоматизированных системах управления электроснабжения / И. Г. Абраменко, А. И. Кузнецов. – Харьков : ХНАГХ, 2008. – 143 с.

138. Савчук В. П. Обработка результатов измерений. Физическая лаборатория : учеб. пособие для студентов вузов / В. П. Савчук. – Одесса : ОНПУ, 2002. – 54 с.

139. Хокинс Г. Цифровая электроника для начинающих / Г. Хокинс. – М. : Мир, 1986. – 232 с.

140. Ціделко В. Д. Невизначеність вимірювання. Обробка даних і подання результату вимірювання / В. Д. Ціделко, Н. А. Яремчук. – К. : ІВЦ Політехніка, 2002. – 176 с.

141. Володарський Є. Т. Метрологічне забезпечення вимірювань і контролю : навчальний посібник / Є. Т. Володарський, В. В. Кухарчук, В. О. Поджаренко, Г. Б. Сердюк. – Вінниця : ВДГУ, 2001. – 219 с.

142. Мирский Г. Я. Электронные измерения / Г. Я. Мирский. – М. : Радио и связь, 1986. – 440 с.

143. Новицкий П. В. Оценка погрешностей результатов измерений / П. В. Новицкий, И. А. Зограф. – Л. : Энергоатомиздат, 1985. – 248 с.

Наукове видання

Мокін Борис Іванович
Мокін Олександр Борисович
Жуков Олексій Анатолійович

**МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ТА СИСТЕМИ
АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ВІТРОВИМ
ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИМ КОМПЛЕКСОМ З ВЕРТИКАЛЬНОЮ
ВІССЮ ОБЕРТАННЯ ВІТРОВОГО КОЛЕСА**

Монографія

Редактор С. Малішевська

Оригінал-макет підготовлено О. Жуковим

Підписано до друку 23.05.2017 р.

Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.

Гарнітура Times New Roman.

Друк різнографічний. Ум. др. арк. 7,16.

Наклад 300 (1-й запуск 1–75) пр. Зам № 2017-084

Вінницький національний технічний університет,

ІРВЦ ВНТУ,

21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,

ВНТУ, ГНК, к. 114.

Тел. (0432) 59-85-32.

press.vntu.edu.ua; *email*: kivc.vntu@gmail.com.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі

Вінницького національного технічного університету

Свідоцтво Держкомінформу України

серія ДК № 746 від 25.12.2001 р.

21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95

ВНТУ, ГНК, к. 114

Тел. (0432) 59-81-59