КовальчукАндрійІвановичЕлектромеханічнасистемаавтономноїбезконтактноїконтрроторноївітроелектроустановкизвертикальноювіссюобертанняДисертаціякандтехннаукНацунтЛьвівполітехнікаЛьвівс

Міністерство освіти і науки України Національний університет “Львівська політехніка”

На правах рукопису

Ковальчук Андрій Іванович

УДК 621.548:621.314.21

**ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНА СИСТЕМА АВТОНОМНОЇ БЕЗКОНТАКТНОЇ КОНТРРОТОРНОЇ ВІТРОЕЛЕКТРОУСТАНОВКИ З ВЕРТИКАЛЬНОЮ ВІССЮ**

**ОБЕРТАННЯ**

Спеціальність 05.09.03 - Електротехнічні комплекси та системи

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор Щур Ігор Зенонович

*Ідентичність усіх примірників дисертації* **ЗАСВІДЧУЮ:**

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради /В.І. Коруд/

Львів - 2015

**ЗМІСТ**

[**ВСТУП 6**](#bookmark1)

**РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ТА ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ ДЛЯ ВІТРОУСТАНОВОК З ВЕРТИКАЛЬНОЮ ВІССЮ ОБЕРТАННЯ 13**

1. Особливості ВЕУ з ВВО 13
2. [Закономірності роботи ВЕУ з ВВО 22](#bookmark6)
3. Огляд існуючих електромеханічних та електротехнічних систем

[ВЕУ з ВВО 24](#bookmark32)

1. Класифікація систем ВЕУ з ВВО 24
2. [Порівняльний аналіз електротехнічних систем автономних ВЕУ на базі СГПМ 30](#bookmark8)
3. Аналіз побудови систем керування роботою автономних ВЕУ з ВВО 32
4. [Принципи побудови систем оптимального керування роботою ВЕУ 32](#bookmark10)
5. [Системи керування роботою ВЕУ за збуренням 33](#bookmark12)
6. [Системи керування роботою ВЕУ за відхиленням 34](#bookmark13)
7. [Інтелектуальні системи керування роботою ВЕУ 35](#bookmark14)
8. [Висновки до розділу та постановка задачі дослідження 36](#bookmark15)
9. [Проблематика малопотужних ВЕУ 36](#bookmark16)
10. [Безконтактна передача енергії 38](#bookmark17)
11. [Відбір енергії в контрроторній ВЕУ з ВВО 39](#bookmark18)

**РОЗДІЛ 2 ДОСЛІДЖЕННЯ ТРАНСФОРМАТОРА З ОБЕРТОВОЮ ПОЛОВИНОЮ ДЛЯ КОНТРРОТОРНОЇ ВІТРОЕЛЕКТРОУСТАНОВКИ З ВЕРТИКАЛЬНОЮ ВІССЮ ОБЕРТАННЯ 43**

1. [Математичне моделювання та розроблення ТзОП для контрроторної ВЕУ з ВВО 43](#bookmark31)
2. Вихідні дані для розроблення ТзОП 43
3. [Параметри Т-подібної заступної схеми 45](#bookmark22)
   1. Розрахунок характеристик трансформатора при різних частотах

[обертання контрроторної ВЕУ з ВВО 49](#bookmark70)

* 1. Математичне моделювання магнітного поля ТзОП для

контрроторної ВЕУ з ВВО 54

* + 1. [Математичний опис магнітного поля 54](#bookmark33)
    2. Математична модель вихрових струмів та втрат потужності

від вихрових струмів 58

* + 1. [Алгоритм польових досліджень ТзОП 60](#bookmark37)
    2. [Результати математичного моделювання 67](#bookmark41)
  1. [Макетування та експериментальні дослідження ТзОП 73](#bookmark42)
  2. [Висновки до розділу 80](#bookmark45)

**РОЗДІЛ 3 ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ ШЛЯХОМ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ТА КОМП’ЮТЕРНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ АВТОНОМНОЇ КОНТРРОТОРНОЇ ВІТРОЕЛЕКТРОУСТАНОВКИ 82**

1. Математичні та комп’ютерні моделі підсистем та системи в цілому .. 82
2. [Перевірка адекватності розробленої моделі ТзОП 94](#bookmark50)
3. Дослідження ефективних режимів роботи контрроторної ВЕУ для

[різних швидкостей вітру 96](#bookmark52)

1. [Розроблення системи керування роботою ВЕУ 100](#bookmark53)
2. Обгрунтування структури квазіоптимального регулювання ... 100
3. [Розроблення естиматора швидкості вітру 101](#bookmark55)
4. [Розроблення трипозиційного регулятора роботи ВЕУ 104](#bookmark58)
   1. Імітаційне моделювання роботи ВЕУ на тестовому профілі вітру .... 109
   2. [Висновки до розділу 122](#bookmark64)

**РОЗДІЛ 4 ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ТРАНСФОРМАТОРА З ОБЕРТОВОЮ ПОЛОВИНОЮ ТА ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА КОНТРРОТОРНОЇ ВІТРОЕЛЕКТРОУСТАНОВКИ З ВЕРТИКАЛЬНОЮ ВІССЮ ОБЕРТАННЯ 124**

1. Оптимізація параметрів ТзОП для різних потужностей ВЕУ 124
2. Прогнозована оцінка вартості ТзОП 124
3. [Техніко-економічна оптимізація параметрів ТзОП 128](#bookmark68)
4. [Порівняльна економічна оцінка традиційної та розробленої контрроторної ВЕУ з ВВО 133](#bookmark69)
5. [Висновки до розділу 137](#bookmark71)

[**ВИСНОВКИ 138**](#bookmark72)

**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 141**

**ДОДАТОК А. РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДИКИ РОЗРАХУНКУ**

**МАКЕТНОГО ВЗІРЦЯ ТзОП 155**

**ДОДАТОК Б. РОЗРАХУНОК ТзОП ДЛЯ КОНТРРОТОРНОЇ ВЕУ 167**

**ДОДАТОК В. АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ 184**

**ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ**

АБ - акумуляторна батарея

АВ - активний випрямляч

АГ - асинхронний генератор

ВВО - вертикальна вісь обертання

ВЕУ - вітроелектроустановка

ВР - вітроротор

ГВО - горизонтальна вісь обертання

ДЕП - двонаправлений електронний перетворювач

ДН - давач напруги

ДС - давач струму

КДН - кероване джерело напруги

МСЕ - метод скінчених елементів

МСР - метод скінчених різниць

САДР - система алгебраїчних диференційних рівнянь

СГПМ - синхронний генератор зі збудженням від постійних магнітів

СЕ - скінчений елемент

ТВМП - точка відбору максимуму потужності

ТЗ - технічне завдання

ТзОП - трансформатор з обертовою половиною

ФДН - формула диференціювання назад

FEM - finite element method (англ.) - МСЕ

**ВСТУП**

Виснаження запасів викопного органічного палива, а також проблеми глобального потепління у зв’язку зі збільшенням в атмосфері відсотку парникових газів пожвавили інтерес світової спільноти в галузі поновлювальних джерел енергетичних ресурсів, у тому числі й енергії вітру.

Перетворення енергії в сучасних вітроелектроустановках (ВЕУ) відбувається в два етапи: кінетична енергія рухомої повітряної маси (вітру) спочатку перетворюється в механічну енергію, а потім механічна - в електричну. Для першого перетворення застосовують аеромеханічні пристрої, які називають вітророторами (ВР). Відомі два основних принципи відбору потужності від рухомого повітряного потоку, на яких базується робота сучасних ВЕУ. Перший принцип використовує ефект підйомної сили крила, маючи в перерізі ВР відповідний аеродинамічний профіль, що знаходиться в повітряному потоці. Другий принцип - диференціальний лобовий опір твердого тіла несиметричної форми, при його різній орієнтації відносно вітру.

Залежно від орієнтації осі обертання по відношенню до напрямку потоку розрізняють ВЕУ з горизонтальною віссю обертання (ГВО), паралельною до напрямку вітрового потоку, та ВЕУ з вертикальною віссю обертання (ВВО), перпендикулярною до напрямку вітрового потоку.

**Актуальність теми.** Потенціал енергії вітру на переважаючих територіях України характеризується невисокими середньорічними швидкостями вітрового потоку на рівні 4 - 5 м/с. На таких вітрах з найбільшою ефективністю можуть працювати малопотужні автономні ВЕУ, які встановлюються поблизу споживачів. Для цього доцільним є використання ВЕУ з ВВО завдяки наступній низці їх переваг: незалежність роботи від напрямку вітру, простота і надійність конструкції через відсутність мультиплікатора, можливість монтажу

безпосередньо на будинках, малий рівень шуму.

Розглядаючи малопотужні автономні ВЕУ, основний наголос ставиться на оптимальному співвідношенні між енергетичною ефективністю та низькою вартістю, що зумовлює зменшення терміну окупності ВЕУ. Для генерування електричної енергії з максимальною енергетичною ефективністю у ВЕУ з ВВО застосовують синхронні генератори зі збудженням від постійних магнітів (СГПМ). З метою підвищення надійності та зниження вартості ВЕУ, використовують прямий привід між ВР та СГПМ. Це приводить до зменшення робочої кутової швидкості генератора, який виконується багатополюсним. Однак, така конструкція СГПМ характеризується великими розмірами та вартістю.

Як один із можливих варіантів виконання ВЕУ з ВВО з прямим приводом та невеликим СГПМ пропонується застосування контрроторної системи ВЕУ, у якій індуктор СГПМ з’єднаний з ротором, а якір - з контрротором. Ротор та контрротор обертаються під дією вітру відносно спільної вертикальної осі у протилежних напрямках, що дає змогу вдвічі підвищити робочу частоту обертання СГПМ і тим самим суттєво зменшити його розміри і вартість. Проте у контрроторній ВЕУ виникає проблема у передачі виробленої електричної енергії з якоря СГПМ, який розміщений на рухомій частині ВЕУ (контрроторі). Стандартним вирішенням цієї проблеми є використання контактних кілець, проте вони знижують надійність роботи ВЕУ.

Для безконтактної передачі виробленої електричної енергії з рухомих частин контрроторної ВЕУ з ВВО, а також регулювання її параметрів пропонується використати спеціальний пристрій - трансформатор з обертовою половиною (ТзОП). Відводи на його вторинній обмотці надають можливість здійснювати регулювання напруги СГПМ за законом, необхідним для максимального відбору енергії від вітру та подальшого найбільш раціонального використання генерованої електроенергії.

**Зв’язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дослідження проводились відповідно до розробленого згідно із Законом України від 11 липня 2001 р. "Про пріоритетні напрямки розвитку науки та техніки" наукового напрямку Інституту енергетики та систем керування Національного університету "Львівська політехніка": "Ресурсозберігаючі технології та інтелектуальні системи керування в енергозабезпеченні об’єктів економічної діяльності".

Основні результати дисертаційної роботи отримані автором у процесі його участі як виконавця держбюджетних науково-дослідних робіт ДБ/Вітро "Комбінована система автономного електрозабезпечення на базі вітро- і фотоелектричних перетворювачів енергії" (держреєстрація №0111U001212, 2011­2012 рр.), ДБ/АБ "Гібридні автономні вітроенергоустановки, що виробляють теплову та електричну енергії" (держреєстрація №0113U001358, 2013-2014 рр.).

**Мета і завдання дослідження.**

Мета роботи - обґрунтування оптимальних параметрів та розроблення електромеханічної системи для контрроторної ВЕУ з ВВО і ТзОП, що забезпечує зниження питомої вартості малопотужних ВЕУ.

Для досягнення мети необхідно розв’язати такі завдання:

* класифікувати ВЕУ за конструктивними та функціональними ознаками; проаналізувати відомі схемотехнічні рішення для різних способів відбору та регулювання параметрів електричної енергії у ВЕУ з СГПМ; обґрунтувати застосування контрроторної ВЕУ для зменшення її питомої вартості;
* розробити математичну модель ТзОП та розрахувати її характеристики при різних частотах обертання контрроторної ВЕУ з ВВО; перевірити адекватність розроблення моделюванням магнітного поля спроектованого ТзОП для контрроторної ВЕУ з ВВО; створити макетний взірець ТзОП та визначити експериментально параметри його заступної схеми;
* створити імітаційну математичну модель усієї контроторної ВЕУ, визначити показники роботи ВЕУ та обґрунтувати оптимальні режими; розробити систему квазіоптимального керування навантаженням ВЕУ з ВВО, яка враховувала б закономірності перебігу аеродинамічних та електротехнічних процесів;
* провести техніко-економічну оптимізацію параметрів ТзОП та техніко- економічну оцінку автономних контрроторних ВЕУ різної потужності.

*Об'єктом дослідження* є процеси перетворення механічної енергії вітропотоку в електричну енергію в системах ВЕУ з ВВО.

*Предметом дослідження* є електромеханічна система безконтактної передачі та регулювання потоку енергії у контрроторній ВЕУ з ВВО за допомогою спеціального пристрою - ТзОП, розрахунок та оптимізація його параметрів, синтез системи квазіоптимального регулювання роботи ВЕУ для ефективного відбору потужності від вітру.

*Методи дослідження.* При вирішенні поставлених в дисертації завдань використовувалися наступні теорії та методи: теорія електричних кіл; теорія автоматичного керування; методи математичного моделювання в середовищі MathCAD для розроблення ТзОП; метод скінчених елементів (FEM-аналіз) для моделювання магнітного поля ТзОП; метод визначення параметрів заступної схеми ТзОП, зокрема досліди неробочого ходу та короткого замикання; методи комп’ютерного симулювання у програмному середовищі MATLAB/Simulink для імітаційного моделювання роботи контрроторної ВЕУ з ВВО; метод експертного оцінювання; метод експериментальних досліджень; метод визначення техніко- економічних параметрів рядів електричних машин.

**Наукова новизна одержаних результатів.**

1. Удосконалено електромеханічну систему контрроторної вітроелектричної установки (ВЕУ) з вертикальною віссю обертання шляхом створення нового електротехнічного комплексу у складі синхронного генератора з постійними магнітами, індуктор і якір якого обертаються в протилежні сторони, і трансформатора, одна половина якого обертається разом із якорем синхронного генератора, що забезпечує безконтактну передачу виробленої електричної енергії, а друга половина має відводи, що дає змогу дискретно регулювати електричне навантаження ВЕУ з метою отримання максимальної енергії від вітру.
2. Розроблено математичну модель трансформатора із обертовою половиною, яка враховує наявність повітряного проміжку між півосердями, змінні в залежності від частоти напруги генератора втрати в сталі та узгоджує реальне навантаження трансформатора з його Т-подібною заступною схемою, що дає змогу застосовувати її у загальній віртуальній комп’ютерній моделі контрроторної ВЕУ для проведення імітаційних досліджень з метою енергетичної оптимізації режимів роботи.
3. Розроблено нову систему квазіоптимального регулювання роботи ВЕУ шляхом перемикання двох відводів від вторинної обмотки трансформатора із обертовою половиною за допомогою трипозиційного дискретного регулятора за відхиленням кутової швидкості генератора від оптимального значення, визначеного за допомогою естиматора швидкості вітру, що забезпечує ефективний відбір енергії від вітру та знижує сумарну вартість ВЕУ.

**Практичне значення одержаних результатів.**

Запропонована контрроторна ВЕУ з ВВО та ТзОП, яка працює на автономне навантаження, може встановлюватися безпосередньо біля споживачів та використовуватися у місцевостях, де середньорічна швидкість вітру є невисокою, зайнявши нішу між дешевими нерегульованими та дорогими оптимально регульованими ВЕУ.

Реалізована комп’ютерна модель ВЕУ з ТзОП, яка відображає реальні процеси в системі, може використовуватися в подальших наукових дослідженнях з метою удосконалення процесів перетворення енергії та регулювання координат у ВЕУ.

Розроблена система регулювання роботи ВЕУ є простою у створенні і налагодженні та може бути використана у реальних ВЕУ інших конфігурацій. Представлена структура та розроблений алгоритм роботи естиматора швидкості вітру можуть бути використані для непрямого її вимірювання в різних системах ВЕУ.

Отримані результати використовуються у навчальних дисциплінах "Інформаційно-керуючі технології в автоматизованих електромеханічних системах" та "Моделювання електроприводів" для студентів спеціальності 7.05070204 "Електромеханічні системи автоматизації та електропривод".

Отримані результати використовуються в інженерній практиці Приватного науково-виробничого підприємства "ЛВ Маркет", яке займається проектуванням електротехнічних систем, в тому числі й з використанням поновлюваних джерел енергії.

**Особистий внесок здобувача** полягає у розробленні електромеханічної системи для контрроторної ВЕУ з ВВО, що включає в себе спеціальний пристрій - ТзОП, який забезпечує безконтактне передавання згенерованої електричної енергії та квазіоптимальне регулювання роботи ВЕУ.

У роботах, написаних у співавторстві, особистий вклад є наступним: [42] - сформовано умову квазіоптимального дискретного регулювання навантаженням СГПМ; [41] - спроектовано, виготовлено і досліджено одну фазу ТзОП з трьома відводами вторинної обмотки; [43] - розроблено математичну модель процесів, що мають місце в усталеному режимі роботи ВЕУ з ВВО та ТзОП; [45] - показано доцільність застосування ТзОП в автономній ВЕУ через його нижчу за прогнозовану собівартість; [40] - створено підсистему квазіоптимального

керування навантаженням ВЕУ з ВВО; [46] - проведено економічне порівняння нової безконтактної контрроторної конструкції ВЕУ з базовим традиційним енергоефективним варіантом ВЕУ з ВВО з одним вітроротором; [113] - проведено імітаційне моделювання роботи ВЕУ з врахуванням розбіжності параметрів та умов роботи двох вітророторів; [114] - проведено імітаційне і експериментальне дослідження створеного макетного взірця ТзОП; [115] - визначено оптимальні діапазони роботи ВЕУ на відповідних відводах вторинних обмоток ТзОП; [25] - запропоновано застосувати відводи вторинних обмоток ТзОП для дискретного регулювання навантаження контрроторної ВЕУ.

**Апробація результатів дисертації.** Результати дисертаційної роботи, основні положення та висновки доповідалися та обговорювалися на Х міжнародній науково-технічній конференції молодих учених і спеціалістів "Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації (ЕСМО-2012)" (м. Кременчук, 2012), XIX та ХХ міжнародних науково-технічних конференціях "Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія та практика (ПАЕП-2012 та ПАЕП-2013)" (смт. Миколаївка, Крим, 2012; с. Малий маяк, Крим, 2013), XIV та XV Міжнародних науково-технічних конференціях "Проблеми

енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика (ICPEES-2013 та ICPEES-2014)" (м. Кременчук, 2013 та 2014),

XXI Міжнародному симпозіумі "Zastosowanie Elektromagnetyzmu w Nowoczesnych Technikach i Informatyce (PTZE-2013)" (Mikolajki, Польща, 2013), семінарі НАН України "Моделі та методи комп’ютерного аналізу електричних кіл та електромеханічних систем" (м. Львів, 2013).

**Публікації.** Основний зміст, наукові положення, результати і висновки дисертаційної роботи опубліковано у 12-ти друкованих наукових працях, з них 8 у наукових фахових виданнях України і 1 у закордонному періодичному виданні. 4 наукові праці входять до міжнародних наукометричних баз даних (Scopus - 1; Index Copernicus - 3; Ulrich’s Periodicals Directory - 3), 2 праці написано без співавторів.

**ВИСНОВКИ**

У дисертаційній роботі вирішено актуальну науково-прикладну задачу зменшення сумарної вартості малопотужних ВЕУ з ВВО без відчутного зниження її енергетичної ефективності, що знижує термін окупності установки. Для цього запропоновано контроторну конструкцію ВЕУ з досить простою і ефективною електромеханічною системою безконтактної передачі та регулювання потоку енергії на базі ТзОП. Проведені дослідження дали змогу отримати нові науково обґрунтовані теоретичні й практичні результати, які є необхідними для розроблення ТзОП, обґрунтування оптимальних параметрів конструкції та побудови системи квазіоптимального керування електричного навантаження ВЕУ. За результатами проведеної роботи можна зробити наступні висновки.

1. У районах з невисокими середньорічними швидкостями вітру доцільним є використання малопотужних автономних ВЕУ з ВВО, що розміщуються безпосередньо біля споживачів. Для розвитку цієї галузі необхідно максимально здешевити установки без суттєвого зниження їх енергетичної ефективності. Одним із продуктивних рішень у цьому напрямку є застосування контрроторної конструкції ВЕУ, у якій суттєво знижуються розмір та вартість СГПМ.
2. Для безконтактної передачі та регулювання виробленої електричної енергії з рухомих частин контрроторної ВЕУ з ВВО запропоновано застосування спеціального пристрою - ТзОП, який має два півосердя з повітряним проміжком між ними та відводи від вторинних обмоток, шляхом перемикання яких можна регулювати електричне навантаження ВЕУ з метою отримання максимальної енергії за зміни швидкості вітру.
3. Використовуючи розроблену математичну модель ТзОП та створену на її основі методику проектування, яка уточнена моделюванням магнітного поля трансформатора за методом скінчених елементів, виготовлено макетний зразок однієї фази ТзОП, експериментальні дослідження якого підтвердили адекватність математичного моделювання.
4. Створена підсистема узгодження реального навантаження та приведеного кола вторинної обмотки ТзОП, в основі якої лежить перехресне автоматичне регулювання з дотриманням балансу потужностей, дає змогу використовувати розроблену віртуальну комп’ютерну модель ТзОП в імітаційному моделюванні роботи контрротної ВЕУ з ВВО на турбулентних вітрах з різними показниками.
5. Сформовано критерій ефективності роботи системи керування навантаженням ВЕУ шляхом перемикання відводів від вторинних обмоток ТзОП, для якого ключовим показником є максимум отримуваної вихідної електричної потужності. Для ефективної роботи ВЕУ у всьому діапазоні швидкостей вітру рекомендується використовувати два відводи вторинної обмотки ТзОП: для швидкостей 3 - 5 м/с - робота на першому відводі, 5 - 10 м/с - на другому.
6. Обгрунтовано та розроблено систему трипозиційного квазіоптимального регулювання роботи ВЕУ з ВВО. Перемикання між відводами рекомендується виконувати з гістерезисом, з метою зменшення кількості перемикань між ними. При досягненні контрроторною ВЕУ з ВВО нижнього критичного значення кутової швидкості необхідним є відмикання навантаження для запобігання її гальмування.
7. З метою здешевлення системи контрроторної ВЕУ з ВВО, рекомендується відмовитися від анемометра, а функцію визначення швидкості вітру перекласти на естиматор, який за виміряними значеннями двох електричних величин - вихідної електричної потужності та частоти напруги генератора - здатен з достатньою точністю (похибка до 10%) визначати значення швидкості вітру.
8. Проведена техніко-економічна оптимізація конструкції ТзОП дала змогу без суттєвого зниження технічних показників здешевити його кінцеву вартість. Підтверджено також зниження вартості нової конструкції контрроторної ВЕУ з ВВО для діапазону реальних потужностей автономних ВЕУ в порівнянні з базовою ВЕУ з одним ВР та активним випрямлячем напруги. Це зниження зростає зі зменшенням потужності ВЕУ: для потужності 10 кВт на 11%, а для 0,4 кВт на 42%.

9. Отримані теоретичні результати впроваджено у навчальний процес кафедри "Електропривод та комп’ютеризовані електромеханічні системи" Національного університету "Львівська політехніка", а практичні результати - у науково-дослідних роботах, що виконуються на основі госпдоговорів у СКБ електромеханічних систем Львівської політехніки та інженерній практиці ПНВП "ЛВ Маркет", яке займається проектуванням електротехнічних систем.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Апсит В.В. Физический смысл расчетных уравнений метода конечных элементов при расчете стационарного двухмерного магнитного поля и их связь с уравнениями Максвелла / В.В. Апсит, Я. А. Новик // Изв. АН Латв.ССР. Сер.физ. и техн. наук. - 1976. - №3. - С. 60-66.
2. Бесекерский В. А. Теория систем автоматического управления /
3. А. Бесекерский, Е.П. Попов. - Санкт-Петербург: Профессия, 2004. - 752 с.
4. Бинс К. Анализ и расчет электрических и магнитных полей / К. Бинс, П. Лауренсон. - Москва: Энергия, 1970. - 376 с.
5. Білецький Ю.О. Енергоформуюче оптимальне керування синхронним генератором з постійними магнітами у складі вітроелектроустановки без давача швидкості вітру / Ю.О. Білецький // Проблеми автоматизованого електроприводу. - 2013. - №36. - С. 403-407.
6. Бойко С.М. Електромеханічний комплекс вітроенергетичної установки автономного живлення електроприймачів шахт та рудників: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.09.03 "Електротехнічні комплекси та системи" / Бойко С.М. - Вінниця, 2014. - 150 с.
7. Воронин С.М. Работа ветроустановки при изменении направления ветра /
8. М. Воронин, Л.В. Бабина // Альтернативная энергетика и экология. - 2010. - №1. - С. 98-100.
9. Гостев В.И. Нечеткие регуляторы в системах автоматического управления / В.И. Гостев. - Київ: Радиоаматор, 2008. - 972 с.
10. Домбровский В.В. Справочное пособие по расчету электромагнитного поля в электрических машинах / В.В. Домбровский. - Ленинград: Энергоатомиздат, 1983. - 256 с.
11. Ермолин Н.П. Расчет трансформаторов малой мощности / Н.П. Ермолин. - Ленинград: Энергия, 1969. - 192 с.
12. Жуков О.А. Математичні моделі та пристрої для автоматичного керування вітровим електротехнічним комплексом з вертикальною віссю обертання: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.09.03 "Електротехнічні комплекси та системи" / Жуков О.А. - Вінниця, 2011. - 165 с.
13. Закон України "Про електроенергетику" № 575/97-ВР від 16.10.1997: [Електронний ресурс] - Режим доступу до ресурсу: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/575/97-%D0%B2%D1%80>.
14. Зарицкая Е.И. Оценка влияния конфигурации магнитной системы на характеристики тихоходного синхронного генератора с постоянными магнитами / Е.И. Зарицкая, М.В. Прыймак, А.М. Олейников // Электротехника и электромеханика. - 2012. - №1. - С. 28-32.
15. Иванов-Смоленский А.В. Электромагнитные поля и процессы в электрических машинах и их физическое моделирование / А.В. Иванов- Смоленский. - Москва: Энергия, 1969. - 304 с.