

ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»  
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова праця  
на правах рукопису

Алексієвський Дмитро Геннадійович

УДК 621.311.24

## **ДИСЕРТАЦІЯ**

### **СИНТЕЗ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК З АЕРОДИНАМІЧНИМ МУЛЬТИПЛІКУВАННЯМ**

Спеціальність 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи  
14 – електрична інженерія

Подається на здобуття наукового  
ступеня доктора технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей  
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Д.Г. Алексієвський

Науковий консультант  
Андрієнко Петро Дмитрович  
доктор технічних наук  
професор

Запоріжжя - 2020

## АНОТАЦІЯ

**Алексієвський Д.Г. Синтез електромеханічних систем вітроенергетичних установок з аеродинамічним мультиплікуванням. – На правах рукопису.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.09.03 «Електротехнічні комплекси та системи» (14 - Електрична інженерія) - Запорізький національний університет, Запоріжжя, 2020. Подана до захисту до спеціалізованої вченої ради Д 64.050.04 у Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут».

Дисертація присвячена вирішенню актуальної наукової проблеми, що полягає у розвитку теоретичних засад синтезу електромеханічних систем вітроенергетичних установок (ВЕУ) з аеродинамічним мультиплікуванням (АДМ), які забезпечують максимальну ефективність роботи ВЕУ з точки зору відбору потужності від вітрового потоку та підвищення їх експлуатаційної надійності.

Запропонована узагальнена математична модель вітроелектрогенеруючої системи ВЕУ з аеродинамічним мультиплікуванням, яка дозволяє отримувати теоретичні залежності, що описують властивості даної системи, в узагальненій формі з метою їх використання при проектуванні даних систем.

Запропоновано графоаналітичний метод аналізу ефекту автооптимізації, який дозволив: дати теоретичне пояснення причин появи цього ефекту та виявити умови, що необхідні для його виникнення, намітити шляхи його більш ефективного використання.

Запропоновано спосіб декомпозиції електромеханічної системи та методикку побудови схем трактів перетворення енергії в цих системах, які дозволяють розглядати широкий клас електромеханічних систем ВЕУ з аеродинамічним мультиплікуванням з єдиних теоретичних позицій, проводити їх аналіз та класифікацію за структурними ознаками, виявляти ці ознаки завдяки наочній візуалізації.

Запропоновано спосіб синтезу візуально-блочних моделей електромеханічних систем ВЕУ з АДМ, який значно скорочує терміни проведення даного синтезу та значно зменшує ймовірність помилок при моделюванні.

Розроблено формалізований алгоритм перетворення візуально-блочної моделі електротехнічного комплексу ВЕУ з АДМ, який дозволяє значно скоротити створення математичного опису електромеханічної системи ВЕУ з АДМ як об'єкту управління, що використовується при синтезі її систем управління.

Розроблено алгоритм моментного керування електромеханічною системою ВЕУ з АДМ, який дозволяє використовувати аеромеханічну систему ВЕУ з АДМ з жорсткою аеродинамічною конструкцією первинного вітроколеса, що значно зменшує капітальні та експлуатаційні витрати на ВЕУ та підвищує її експлуатаційну надійність.

Шляхом математичного моделювання отримано залежності величини перевищення потужності, під час перехідного процесу при реалізації алгоритму моментного управління електромеханічною системою ВЕУ з АДМ, від середнього значення, амплітуди та частоти коливання вітрового потоку, що дозволяє проводити розрахунок встановленої потужності компонентів електрообладнання ВЕУ.

В результаті модельного експерименту отримано характеристики впливу параметрів системи на величину вихідної потужності, що дозволило визначити оптимальні режими керування електромеханічною системою ВЕУ з АДМ.

За допомогою експериментальної ВЕУ було підтверджено працездатність запропонованого способу моментного управління ВЕУ з АДМ.

Розроблено схему та алгоритм функціонування імітатора аеромеханічної підсистеми, який дозволяє створити стенд для випробування електрообладнання ВЕУ з АДМ в лабораторних або цехових

умовах як на стадії розробки нового електрообладнання, так і при випробуванні електрообладнання при серійному виробництві цих систем.

Результати роботи було використано при проектуванні електрообладнання ВЕУ з АДМ ТГ-750, ТГ-1000 ВАТ «НДІ «Перетворювач» (м. Запоріжжя) і КБ «Конкорд» (м. Дніпро) та в перспективній розробці КБ «Голубенко» ВАТ «Згода» (м. Дніпро) ВЕУ з АДМ ТГ-2100 потужністю 2100 кВт.

*Ключові слова:* вітроенергетична установка, електромеханічна система, аеродинамічне мультиплікування, система автоматичного керування, моментне керування.

### **Список опублікованих праць:**

1. Актуальні проблеми промислової електроніки: монографія / Д.Г. Алексієвський, Т.В. Критська, Ю.С. Оселечик та ін.; Міністерство освіти і науки України, Запорізька державна інженерна академія. – Запоріжжя: ЗДІА. – 2018. – 192 с.
2. Алексеевский Д.Г. Имитация поведения ветротурбин с учетом динамики / А.В. Переверзев, Д.Г. Алексеевский, А.Н. Буров // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КДПУ. – 2008. – №3(50), Ч.2.– С. 143–146.
3. Алексеевский Д.Г. Моделирование электромеханической системы ВЭУ с аэродинамическим мультипликатором в режиме стабилизации скорости ветровых турбин / Н.С. Голубенко, П.Д. Андриенко, И.Ю. Немудрый, Д.Г. Алексеевский // Електротехніка і електроенергетика. – Запоріжжя: ЗНТУ. - 2011. – № 1.– С. 70–73.
4. Алексеевский Д.Г. Динамика ветроэлектрической установки с аэродинамической мультипликацией / Д.Г. Алексеевский, В.П. Метельский, И.Ю. Немудрый // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – Одеса: ОНПУ. – 2011. – №3 (79). – С. 253–254.
5. Алексеевский Д.Г. Структура электромеханической системы для имитации характеристик ветротурбин без датчиков на валу двигателя /

Д.Г. Алексеевский, А.Н. Буров, А.О. Бурова // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчуг: КрНУ. – 2011. – №6(71), – Ч.1.– С. 11–16.

6. Алексеевский Д.Г. Анализ режимов работы ветроэлектрической установки с аэродинамической мультипликацией / Д.Г. Алексеевский, П.Д. Андриенко, В.П. Метельский, И.Ю. Немудрый // Електротехніка і електроенергетика. – Запоріжжя: ЗНТУ. – 2012. – №1.– С. 69–72.

7. Алексеевский Д.Г. Анализ поведения электромеханической системы ВЭУ с аэродинамическим мультиплицированием с учетом потерь / Д.Г. Алексеевский, А.А. Бурова, С.А. Кулаков // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Серія: «Нові рішення в сучасних технологіях». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2013. – №18(991). – С. 61–65.

8. Алексеевский Д.Г. Анализ эффективности моментного управления электромеханической системой ВЭУ / Д.Г. Алексеевский // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки. – Чернігів: ЧДТУ. – 2013. – №2(65). – С. 17–24.

9. Алексеевский Д.Г. Определение коэффициента преобразования мощности электромеханической системы ВЭУ с аэродинамическим мультиплицированием / Д.Г. Алексеевский, А.А. Бурова, А.Н. Буров, С.А. Кулаков // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки. – Чернігів: ЧДТУ. – 2014. – №2(73). – С. 176–180.

10. Алексеевский Д.Г. Объяснение эффекта автооптимизации электромеханической системы ВЭУ с аэродинамическим мультиплицированием / Д.Г. Алексеевский // Технічні науки та технології. Науковий журнал. Серія: Технічні науки. – Чернігів: ЧНТУ. – 2015. – №1(1). – С. 170–176.

11. Алексієвський Д.Г. Моментне управління ВЕУ з аеродинамічним мультиплікуванням / Д.Г. Алексієвський // Вісник Київського

національного університету технології і дизайну. Серія: Технічні науки. – Київ: КНУТД. – 2015. – №5(90). – С. 32–36.

12. Алексеевский Д.Г. Анализ эффективности алгоритма моментного управления ВЭУ с аэродинамическим мультиплицированием / Д.Г. Алексеевский, // Електротехніка і електромеханіка. Спецвипуск: Системи керування і контролю перетворювачами електроенергії. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2016. – №4(1). – С. 75–77.

13. Алексієвський Д.Г. Морфологічний аналіз структур вітроелектрогенеруючих систем з аеродинамічним мультиплікуванням / Д.Г. Алексеевский, О.О. Панкова // Вісник Київського національного університету технології і дизайну. Серія: Технічні науки. – Київ: КНУТД. – 2016. – №5(102). – С. 39–44.

14. Алексеевский Д.Г. Исследование влияния координат рабочей точки на параметры модели ВЭУ с аэродинамическим мультиплицированием / Д.Г. Алексеевский, О.О.Панкова, П.А. Щипанский // Технічні науки та технології. Науковий журнал. Серія: Технічні науки. – Чернігів: ЧНТУ. – 2016. – №3(5). – С. 198–203.

15. Алексієвський Д.Г. Визначення передавальної матриці ланки аеродинамічного перетворення електромеханічної системи ВЕУ з аеродинамічним мультиплікуванням / Д.Г. Алексієвський, П.Д. Андрієнко, О.О. Панкова // Вісник Київського національного університету технології і дизайну. Серія: Технічні науки. – Київ: КНУТД. –2017. – №1(106). – С. 11–20.

16. Алексеевский Д.Г. Визуальное моделирование многоканальных ветроэлектрогенерирующих систем / Д.Г. Алексеевский // Вісник національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". – Харків: НТУ «ХПІ». – 2017. – № 27(1249). – С. 332–336.

17. Алексеевский Д.Г. Визуальная модель трехфазного мостового выпрямителя / Д.Г. Алексеевский, А.Г. Алексеев, К.О. Турышев, О.О. Панкова // Вісник національного технічного університету

"Харківський політехнічний інститут". – Харків: НТУ «ХПІ». – 2017. – №27(1249). – С. 309–312.

18. Алексеевский Д.Г. Определение рабочей области ИППН в составе электромеханической системы ВЭУ с переменной скоростью вращения / Д.Г. Алексеевский, П.Д. Андриенко, К.О. Турышев, О.О. Панкова // Електротехніка і електроенергетика. – Запоріжжя: ЗНТУ. – 2017. – №1. – С. 79–85.

19. Алексієвський Д.Г. Синтез моделей у змінних стану для багатоканальних вітроелектрогенеруючих систем / Д.Г. Алексієвський // Вісник Київського національного університету технології і дизайну. Серія: Технічні науки. – Київ: КНУТД. – 2017. – №5(114). – С. 11–16.

20. Алексеевский Д.Г. Динамика моментного управления электромеханической системы ВЭУ с аэродинамическим мультиплицированием / Д.Г. Алексеевский, А.Г. Алексеев, О.О. Панкова, К.О. Турышев, А.В. Таранець, С.Л. Шмалій // Вісник національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". – Харків: НТУ «ХПІ». – 2018. – № 26(1302). – С. 13–18.

21. Алексієвський Д.Г. Візуальне моделювання однофазного мостового випрямляча / О.Г. Алексєєв, Д.Г. Алексієвський, К.О. Туришев, С.Л. Шмалій, О.О. Панкова // Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України. – Київ: ІЕД НАНУ. – 2018. – №50. – С. 88–91.

22. Алексієвський Д.Г., Візуальна математична модель електромеханічної системи вітроенергетичної установки з аеродинамічним мультиплікуванням / Д.Г. Алексієвський, К.В. Манаєв, О.О. Панкова, А.В. Таранець, С.Л. Шмалій // Вісник Київського національного університету технології і дизайну. Серія: Технічні науки. – Київ: КНУТД. – 2018. – №4(124). – С. 45–55.

23. Alekseevskiy D. Procedure for the synthesis of models of electro-technical complexes / D. Alekseevskiy, O. Pankova, R. Khrestin // Eastern-

European Journal of Enterprise Technologies. – Kharkiv: PC «Technology center». – 2018. – № 6/9(96). – С. 48–54.

24. Алексеевский. Д.Г. Визуально-блочная модель импульсного преобразователя постоянного напряжения инвертирующего типа / Д.Г. Алексеевский, О.О. Панкова, К.О. Турышев // Вісник національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". – Харків: НТУ «ХПІ». – 2019. – № 20(1345). – С. 61–66.

25. Алексеевский Д.Г. Моделирование имитатора ветротурбины на базе привода постоянного тока / Д.Г. Алексеевский, А.Н. Буров А.В. Переверзев, // Технічна електродинаміка. – Київ: ІЕД НАНУ. – 2007. Тем. вип. «Проблеми сучасної електротехніки». – Ч.4. – С. 82–83.

26. Алексеевский Д.Г. Стенд для испытания электрооборудования ветроэнергетических установок / А.В. Переверзев, В.В. Семенов, Д.Г. Алексеевский, А.Н. Буров // Технічна електродинаміка. – Київ: ІЕД НАНУ. Тем. випуск «Проблеми сучасної електротехніки». – 2008. – Ч.1. – С. 48–51.

27. Алексеевский Д.Г. Об использовании крановых асинхронных двигателей в качестве генераторов для автономных ВЭУ / А.В. Переверзев, В.В. Семенов, Д.Г. Алексеевский, А.Н. Буров, Г.Н. Стрункин, А.В. Таранец // Технічна електродинаміка. – Київ: ІЕД НАНУ. Тем. випуск «Силовая електроніка та енергоефективність». – 2008. – Ч.1. – С. 20–23.

28. Алексеевский Д.Г. Определение передаточной функции звена аэродинамического преобразования электромеханической системы ВЭУ с аэродинамическим мультиплицированием / Д.Г. Алексеевский // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2015. – №12(1121). – С. 168–172.

29. Alekseevskiy D. Comparative analysis of static control paths wind turbine variable speed wind turbine / D. Alekseevskiy, T. Kritskaya, O. Pankova, V. Kulikov, A. Dostaeva, S. Arinova // Electronic scientific journal. – Karaganda, Kazakhstan: Karaganda State Technical University. – 2016. – №6. – С. 14–21.

30. Алексеевский Д.Г. Экспериментальная ветроэнергетическая установка / Д.Г. Алексеевский, К.В. Манаев // Sumqayıt Dövlət Universiteti Tələbə Elmi Cəmiyyətinin III Tələbə Elmi konfransının materialları prof. R.S.Məmmədovun ümumi redaktəsi ilə. – Sumqayıt: SDU-nun Redaksiya və nəşr işləri şöbəsi. – 2017.– С. 163–164.

31. Алексеевский Д.Г. Математическая модель экспериментальной ветроэнергетической установки / Д.Г. Алексеевский, О.Н. Прокопеня, О.О. Панкова, К.В. Манаев // Вестник Брестского государственного технического университета. – Брест: БГТУ. – 2017. – №4(106). – С. 40–43.

32. Алексеевский Д.Г. Оперативное определение характеристик ветротурбины для ветроэнергетической установки с переменной скоростью вращения / Д.Г. Алексеевский, Т.В. Критская, О.О. Панкова, К.О. Турышев // Сумгаитский государственный университет. Материалы международной научной конференции «Актуальные вопросы прикладной физики и энергетики». – Сумгаит: СГУ. – 2018. – С. 341–344.

33. Алексеевский Д.Г. Реализация алгоритма получения матрицы переменных состояний для трехканального ветроэнергетического комплекса/ Д.Г. Алексеевский, Т.В. Критская, К.В. Манаев, А.В. Таранец // Сумгаитский государственный университет. Материалы международной научной конференции «Актуальные вопросы прикладной физики и энергетики», – Сумгаит: СГУ. – 2018.– С. 344–447.

34. Алексієвський Д.Г. Анализ эффективности алгоритмов управления ветроэнергетической установкой с аэродинамическим мультиплицированием / Д.Г. Алексієвський, О.Н. Прокопеня, О.О. Панкова, К.В. Манаев // Вестник Брестского государственного технического университета. – Брест: БГТУ. – 2018. – №4(112). – С. 31–33.

35. Алексеевский Д.Г. Исследование схем преобразования электроэнергии в ветроэлектрических установках с аэродинамической мультипликацией / Д.Г. Алексеевский, П.Д. Андриенко, О.В. Немыкина // Problemele energeticii regionale. – Chişinău: Institutul de Energetica, Republica Moldova. – 2019. – №1(39). – С. 70–79.

36. Патент України на корисну модель №26494 ПМК H02K 17/34 (2007/01). Автономна вітроелектрогенеруюча система / Алексієвський Д.Г., Буров О.М., Веселов К.І., Омельчук Н.А., Переверзєв А.В., Семенов В.В., Стрункін Г.М., Таранець А.В. заявл. 11.05.2007, опубл. 25.09.2007, Бюл. №16.

37. Патент України на корисну модель №79246 ПМК H02P 27/05 (2006/01), F03D 11/02 (2006.01). Імітатор вітротурбіни / Алексієвський Д.Г., Семенов В.В., Буров О.М., Бурова А.О. заявл 04.12.2012, опубл. 10.04.2013, Бюл. №7.

38. Патент України на корисну модель №100496 ПМК H02P 7/285 (2015.01), F03D 11/00, F03D 7/00 (2006.01). Система імітації вітротурбіни/ Буров О.М., Алексієвський Д.Г., Бурова А.О. заявл. 23.02.2015, опубл. 27.07.2015, Бюл. №14.

39. Алексеевский Д.Г. Эффективность преобразования мощности при аэродинамическом мультиплицировании / Д.Г. Алексеевский, П.Д. Андриенко, А.Ю. Кулаков // Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Україна-Польща: діалог культур в контексті євроінтеграції». Секція: «Інформаційні керуючі системи». – Запоріжжя: ЗДІА. – 2014. – С. 223–224.

40. Алексієвський Д.Г. Аналіз проблеми побудови імітатору вітротурбіни великої потужності / Д.Г. Алексієвський, А.О. Бурова // Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Україна-Польща: діалог культур в контексті євроінтеграції». Секція: «Інформаційні керуючі системи». – Запоріжжя: ЗДІА. – 2014. – с. 222.

41. Alekseevskiy D. Investigation of the Supernominal Power Throws Factors on the Wind Turbine With Variable Speed / D. Alekseevskiy, O. Pankova, A Alyekseeev, K. Turyshev, S. Shmaliy // 2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS). – Kharkiv. – 2018. – P. 172–175.

## ANNOTATION

**Alekseevskiy D.G. Synthesis of wind power plants electromechanical systems with aerodynamic multiplication.** Manuscript.

Dissertation on achieving the scientific degree Doctor of Technical Science by specialty 05.09.03 «Electrotechnical Complexes and Systems» (14 - Electrical engineering) - Zaporizhzhya National University, Zaporizhzhia, 2020. Filed for defense at a specialized academic council D 64.050.04 at the National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute».

The development of the synthesis theoretical base of the wind power plants electromechanical systems with aerodynamic multiplication (ADM), provide the maximum efficiency of wind turbines in power take-off from the wind flow terms and increase their operational reliability, was the dissertation subject.

A generalized wind turbine with aerodynamic multiplication mathematical model was proposed. This model allows one to obtain theoretical dependencies describing the properties of a given system in a generalized form for the purpose of its use in the design of these systems.

The graph analytical method for analyzing the effect of auto-optimization is proposed in the thesis. This method allowed us to give a theoretical explanation of the reasons for the appearance of the auto-optimization effect, discovered the conditions for its occurrence, and outlined the ways for its more efficient use.

The decomposition method of the electromechanical system and the methodology for constructing circuits of energy conversion paths in these systems are also proposed in the paper. These methods allow us to consider a wide class of wind turbines with aerodynamic multiplication from a single theoretical point of view analyze and classify them according to structural features, and identify these features through visualization.

A method of visual-block models synthesis of wind turbines with ADM is proposed. This method significantly shortens synthesis time and significantly reduces the probability of modeling errors.

A formalized algorithm for the transformation of the visual-block model of the electrotechnical complex of wind turbines with ADM has been developed.

An algorithm for the instantaneous control of a wind turbines electromechanical system with ADM was developed. The algorithm allows using the wind system with the rigid aerodynamic design of the primary wind wheel, which significantly reduces the capital and operational costs of the wind turbine and increases its operational reliability.

The excess power amount dependence, during the transition process, when implementing the algorithm for instant control of the wind turbine electromechanical system with ADM, on the amplitude and frequency of the wind flow oscillations, which allows you to calculate the installed power in the elements of electrical equipment, are got as the result by mathematical modeling.

As the result of the model experiment, the influence of the system parameters characteristics on the output power was obtained, which made it possible to determine the optimal control modes for the electromechanical system of wind turbines with ADM.

With the help of an experimental wind turbine, the efficiency of the proposed method of instantaneous control of wind turbine with ADM was confirmed.

The scheme and algorithm of functioning of the simulator of the aeromechanical subsystem are developed. This allows creating a stand for electrical equipment testing of wind turbines with ADM in laboratory or workshop conditions both at the development stage of new electrical equipment and during testing of electrical equipment during the batch production of these systems.

The results of the work were used in the design of wind turbine electrical equipment with ADM TG-750, TG-1000 of OJSC "Preobrazovatel" Research Institute (Zaporizhzhya) and Concord CB (Dnipro) and in the prospective development of Golubenko CB of OJSC "Zgoda" (Dnipro) Wind turbine with ADM TG-2100 capacity of 2100 kW.

Keywords: wind power plant, electromechanical system, aerodynamic multiplication, automatic control system, torque control.

#### List of published works:

1. Aktualni problemy promyslovoi elektroniky: monografiia / D.H. Aleksiievskiy, T.V. Krytska, Yu.S. Oseledchik ta in.; M-vo osvity i nauky Ukrainy, Zaporizka derzhavna inzhenerna akademiia. – Zaporizhzhia: ZDIA. – 2018. – 192 s.

2. Alekseevskij D.G. Imitaciya povedeniya vetroturbin s uchetom dinamiki / A.V. Pereverzev, D.G. Alekseevskij, A.N. Burov // Visnyk Kremenchuiskoho derzhavnogo politekhnichnogo universytetu imeni Mykhaila Ostrohradskoho. – Kremenchuh: KDPU. – 2008. – №3(50), Ch.2.– S. 143–146.

3. Alekseevskij D.G. Modelirovanie elektromekhanicheskoy sistemy VEU s aerodinamicheskim mul'tiplikatorom v rezhime stabilizacii skorosti vetrovyh turbin / N.S. Golubenko, P.D. Andrienko, I.Yu. Nemudryj, D.G. Alekseevskij // Elektrotehnika i elektroenerhetyka. – Zaporizhzhia: ZNTU. 2011. – № 1.– S. 70–73.

4. Alekseevskij D.G. Dinamika vetroelektricheskoy ustanovki s aerodinamicheskoy mul'tiplikaciej / D.G. Alekseevskij, V.P. Metel'skij, I.Yu. Nemudryj // Elektrotekhnichni ta kompiuterni systemy. – Odesa: ONPU. – 2011. – №3 (79). – S. 253–254.

5. Alekseevskij D.G. Struktura elektromekhanicheskoy sistemy dlya imitacii harakteristik vetroturbin bez datchikov na valu dvigatelya / D.G. Alekseevskij, A.N. Burov, A.O. Burova // Visnyk Kremenchuiskoho

natsionalnoho universytetu imeni Mykhaila Ostrohradskoho. – Kremenchuh: KrNU. – 2011. – №6(71), – Ch.1.– S. 11–16.

6. Alekseevskij D.G. Analiz rezhimov raboty vetroelektricheskoy ustanovki s aerodinamicheskoy mul'tiplikaciej / D.G. Alekseevskij, P.D. Andrienko, V.P. Metel'skij, I.Yu. Nemudryj // Elektrotehnika i elektroenerhetyka. – Zaporizhzhia: ZNTU. – 2012. – №1.– S. 69–72.

7. Alekseevskij D.G. Analiz povedeniya elektromekhanicheskoy sistemy VEU s aerodinamicheskim mul'tiplicirovaniem s uchetom poter' / D.G. Alekseevskij, A.A. Burova, S.A. Kulakov // Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «Kharkivskiyi politekhnichnyi instytut». Serii: «Novi rishennia v suchasnykh tekhnolohiiakh». – Kharkiv: NTU «KhPI». – 2013. – №18(991). – S. 61–65.

8. Alekseevskij D.G. Analiz effektivnosti momentnogo upravleniya elektromekhanicheskoy sistemoj VEU / D.G. Alekseevskij // Visnyk Chernihivskoho derzhavnogo tekhnolohichnoho universytetu. Serii: Tekhnichni nauky. – Chernihiv: ChDTU. – 2013. – №2(65). – S. 17–24.

9. Alekseevskij D.G. Opredelenie koefficienta preobrazovaniya moshchnosti elektromekhanicheskoy sistemy VEU s aerodinamicheskim mul'tiplicirovaniem / D.G. Alekseevskij, A.A. Burova, A.N. Burov, S.A. Kulakov // Visnyk Chernihivskoho derzhavnogo tekhnolohichnoho universytetu. Serii: Tekhnichni nauky. – Chernihiv: ChDTU. – 2014. – №2(73). – S. 176–180.

10. Alekseevskij D.G. Ob"yasnenie efekta avtooptimizacii elektromekhanicheskoy sistemy VEU s aerodinamicheskim mul'tiplicirovaniem / D.G. Alekseevskij // Tekhnichni nauky ta tekhnolohii. Naukovyi zhurnal. Serii: Tekhnichni nauky. – Chernihiv: ChNTU. – 2015. – №1(1). – S. 170–176.

11. Aleksiievskiyi D.G. Momentne upravlinnia VEU z aerodynamichnym multiplykuvanniam / D.G. Aleksiievskiyi // Visnyk Kyivskoho natsionalnoho

universytetu tekhnolohii i dyzainu. Serii: Tekhnichni nauky. – Kyiv: KNUTD. – 2015. – №5(90). – S. 32–36.

12. Alekseevskij D.G. Analiz effektivnosti algoritma momentnogo upravleniya VEU s aerodinamicheskim mul'tiplicirovaniem / D.G. Alekseevskij, // Elektrotehnika i elektromekhanika. Spetsvypusk: Systemy keruvannia i kontroliu peretvoriuvachamy elektroenerhii. – Kharkiv: NTU «KhPI». – 2016. – №4(1). – S. 75–77.

13. Aleksiievskiy D.G. Morfolohichni analiz struktur vitroelektroheneruiuchykh system z aerodynamichnym multiplykuvanniam / D.G. Alekseevskiy, O.O. Pankova // Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu tekhnolohii i dyzainu. Serii: Tekhnichni nauky. – Kyiv: KNUTD. – 2016. – №5(102). – S. 39–44.

14. Alekseevskij D.G. Issledovanie vliyaniya koordinat rabochej toчки na parametry modeli VEU s aerodinamicheskim mul'tiplicirovaniem / D.G. Alekseevskij, O.O.Pankova, P.A. SHCHipanskij // Tekhnichni nauky ta tekhnolohii. Naukovyi zhurnal. Serii: Tekhnichni nauky. – Chernihiv: ChNTU. – 2016. – №3(5). – S. 198–203.

15. Aleksiievskiy D.G. Vyznachennia peredavalnoi matrytsi lanky aerodynamichnoho peretvorennia elektromekhanichnoi systemy VEU z aerodynamichnym multiplykuvanniam / D.G. Aleksiievskiy, P.D. Andriienko, O.O. Pankova // Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu tekhnolohii i dyzainu. Serii: Tekhnichni nauky. – Kyiv: KNUTD. – 2017. – №1(106). – S. 11–20.

16. Alekseevskij D.G. Vizual'noe modelirovanie mnogokanal'nyh vetroelektrogeneriruyushchih sistem / D.G. Alekseevskij // Visnyk natsionalnoho tekhnichnoho universytetu "Kharkivskiy politekhnichniy instytut". – Kharkiv: NTU «KhPI». – 2017. – № 27(1249). – S. 332–336.

17. Alekseevskij D.G. Vizual'naya model' trekhfaznogo mostovogo vypryamitelya / D.G. Alekseevskij, A.G. Alekseev, K.O. Turyshev, O.O. Pankova // Visnyk natsionalnoho tekhnichnoho universytetu "Kharkivskiy

politekhnichnyi instytut". – Kharkiv: NTU «KhPI». – 2017. – №27(1249). – S. 309–312.

18. Alekseevskij D.G. Opredelenie rabochej oblasti IPPN v sostave elektromekhanicheskoy sistemy VEU s peremennoj skorost'yu vrashcheniya / D.G. Alekseevskij, P.D. Andrienko, K.O. Turyshev, O.O. Pankova // Elektrotehnika i elektroenerhetyka. – Zaporizhzhia: ZNTU. – 2017. – №1. – S. 79–85.

19. Aleksiiievskiy D.G. Syntez modelei u zminnykh stanu dlia bahatokanalnykh vitroelektroheneruiuchykh system / D.G. Aleksiiievskiy // Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu tekhnolohii i dyzainu. Serii: Tekhnichni nauky. – Kyiv: KNUTD. – 2017. – №5(114). – S. 11–16.

20. Alekseevskij D.G. Dinamika momentnogo upravleniya elektromekhanicheskoy sistemy VEU s aerodinamicheskim mul'tiplicirovaniem / D.G. Alekseevskij, A.G. Alekseev, O.O. Pankova, K.O. Turyshev, A.V. Taranec', S.L. Shmalij // Visnyk natsionalnoho tekhnichnoho universytetu "Kharkivskiy politekhnichnyi instytut". – Kharkiv: NTU «KhPI». – 2018. – №26(1302). – S. 13–18.

21. Aleksiiievskiy D.G. Vizualne modeliuвання odnofaznogo mostovoho vypriamliacha / O.H. Aleksieiev, D.G. Aleksiiievskiy, K.O. Turyshev, S.L. Shmalii, O.O. Pankova // Pratsi Instytutu elektrodynamiky Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy. – Kyiv: IED NANU. – 2018. – №50. – S. 88–91.

22. Aleksiiievskiy D.G., Vizualna matematychna model elektromekhanichnoi systemy vitroenerhetychnoi ustanovky z aerodynamichnym multiplykuvanniam / D.G. Aleksiiievskiy, K.V. Manaiev, O.O. Pankova, A.V. Taranets, S.L. Shmalii // Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu tekhnolohii i dyzainu. Serii: Tekhnichni nauky. – Kyiv: KNUTD. – 2018. – №4(124). – S. 45–55.

23. Alekseevskiy D. Procedure for the synthesis of models of electro-technical complexes / D. Alekseevskiy, O. Pankova, R. Khrestin // Eastern-

European Journal of Enterprise Technologies. – Kharkiv: PC «Technology center». – 2018. – № 6/9(96). – S. 48–54.

24. Alekseevskij. D.G. Vizual'no-blochnaya model' impul'snogo preobrazovatelya postoyannogo napryazheniya invertiruyushchego tipa / D.G. Alekseevskij, O.O. Pankova, K.O. Turyshev // Visnyk natsionalnoho tekhnichnoho universytetu "Kharkivskiy politekhnichnyi instytut". – Kharkiv: NTU «KhPI». – 2019. – № 20(1345). – S. 61–66.

25. Alekseevskij D.G. Modelirovanie imitatora vetroturbiny na baze privoda postoyannogo toka / D.G. Alekseevskij, A.N. Burov A.V. Pereverzev, // Tekhnichna elektrodinamika. – Kiïv: IED NANU. – 2007. Tem. vip. «Problemi suchasnoï elektrotekhniki». –CH.4. – S. 82–83.

26. Alekseevskij D.G. Stend dlya ispytaniya elektrooborudovaniya vetroenergeticheskikh ustanovok / A.V. Pereverzev, V.V. Semenov, D.G. Alekseevskij, A.N. Burov // Tekhnichna elektrodinamika. – Kyiv: IED NANU. Tem. vypusk «Problemy suchasnoi elektrotekhniki». – 2008.– Ch.1. – S. 48–51.

27. Alekseevskij D.G. Ob ispol'zovanii kranovykh asinhronnykh dvigatelej v kachestve generatorov dlya avtonomnykh VEU / A.V. Pereverzev, V.V. Semenov, D.G. Alekseevskij, A.N. Burov, G.N. Strunkin, A.V. Taranec // Tekhnichna elektrodinamika. – Kyiv: IED NANU. Tem. vypusk «Sylova elektronika ta enerhoefektyvnist». – 2008. – Ch.1. – S. 20–23.

28. Alekseevskij D.G. Opredelenie peredatochnoj funkicii zvena aerodinamicheskogo preobrazovaniya elektromekhanicheskoy sistemy VEU s aerodinamicheskim mul'tiplicirovaniem / D.G. Alekseevskij // Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «Kharkivskiy politekhnichnyi instytut». – Kharkiv: NTU «KhPI». – 2015. – №12(1121). – S. 168–172.

29. Alekseevskiy D. Comparative analysis of static control paths wind turbine variable speed wind turbine / D. Alekseevskiy, T. Kritskaya, O. Pankova, V. Kulikov, A. Dostaeva, S. Arinova // Electronic scientific journal. – Karaganda, Kazakhstan: Karaganda State Technical University. – 2016. – №6. – S. 14–21.

30. Alekseevskij D.G. Eksperimental'naya vetroenergeticheskaya ustanovka / D.G. Alekseevskij, K.V. Manaev // Sumqayıt Devlet Universiteti Telyabe Elmi Camiyyetinin III Telyabe Elmi konfransının materialları prof. R.S.Memmedovun umumi redaktesi ilya. – Sumqayıt: SDU-nun Redaksiya ve neshr ishlyari shebesi. – 2017.– S. 163–164.

31. Alekseevskij D.G. Matematicheskaya model' eksperimental'noj vetroenergeticheskoy ustanovki / D.G. Alekseevskij, O.N. Prokopenya, O.O. Pankova, K.V. Manaev // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – Brest: BGTU. – 2017. – №4(106). – S. 40–43.

32. Alekseevskij D.G. Operativnoe opredelenie harakteristik vetroturbiny dlya vetroenergeticheskoy ustanovki s peremennoj skorost'yu vrashcheniya / D.G. Alekseevskij, T.V. Kritskaya, O.O. Pankova, K.O. Turyshev // Sumgait'skiy gosudarstvennyy universitet. Materialy mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii «Aktual'nye voprosy prikladnoj fiziki i energetiki». – Sumgait: SGU. – 2018. – S. 341–344.

33. Alekseevskij D.G., Realizaciya algoritma polucheniya matricy peremennyh sostoyanij dlya trekhkanal'nogo vetroenergeticheskogo kompleksa / D.G. Alekseevskij, T.V. Kritskaya, K.V. Manaev, A.V. Taranec // Sumgait'skiy gosudarstvennyy universitet. Materialy mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii «Aktual'nye voprosy prikladnoj fiziki i energetiki», – Sumgait: SGU. – 2018.– S. 344–447.

34. Alekseevskij D.G. Analiz effektivnosti algoritmov upravleniya vetroenergeticheskoy ustanovkoj s aerodinamicheskim mul'tiplicirovaniem / D.G. Alekseevskij, O.N. Prokopenya, O.O. Pankova, K.V. Manaev // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – Brest: BGTU. – 2018. – №4(112). – S. 31–33.

35. Alekseevskij D.G. Issledovanie skhem preobrazovaniya elektroenergii v vetroelektricheskikh ustanovkakh s aerodinamicheskoy mul'tiplikaciej / D.G. Alekseevskij, P.D. Andrienko, O.V. Nemykina //

Problemele energeticii regionale. – Chishinau: Institutul de Energetica, Republica Moldova. – 2019. – №1(39). – S. 70–79.

36. Patent Ukrainy na korysnu model №26494 PMK H02K 17/34 (2007/01). Avtonomna vitroelektroheneruiucha systema / Aleksiiievskiy D.H., Burov O.M., Veselov K.I., Omelchuk N.A., Pereverziev A.V., Semenov V.V., Strunkin H.M., Taranets A.V. zaiavl. 11.05.2007, opubl. 25.09.2007, Biul. №16.

37. Patent Ukrainy na korysnu model №79246 PMK H02P 27/05 (2006/01), F03D 11/02 (2006.01). Imitator vitroturbiny / Aleksiiievskiy D.H., Semenov V.V., Burov O.M., Burova A.O. zaiavl 04.12.2012, opubl. 10.04.2013, Biul. №7.

38. Patent Ukrainy na korysnu model №100496 PMK H02P 7/285 (2015.01), F03D 11/00, F03D 7/00 (2006.01). Systema imitatsii vitroturbiny/ Burov O.M., Aleksiiievskiy D.H., Burova A.O. zaiavl. 23.02.2015, opubl. 27.07.2015, Biul. №14.

39. Alekseevskij D.G. Effektivnost' preobrazovaniya moshchnosti pri aerodinamicheskom mul'tiplicirovanii / D.G. Alekseevskij, P.D. Andrienko, A.YU. Kulakov // Materialy mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii «Ukraina-Polshcha: dialoh kultur v konteksti yevrointehratsii». Sektsiia: «Informatsiini keruiuchi systemy». – Zaporizhzhia: ZDIA. – 2014. – S. 223–224.

40. Aleksiiievskiy D.G. Analiz problemy pobudovy imitatoru vitroturbiny velykoi potuzhnosti / D.H. Aleksiiievskiy, A.O. Burova // Materialy mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii «Ukraina-Polshcha: dialoh kultur v konteksti yevrointehratsii». Sektsiia: «Informatsiini keruiuchi systemy». – Zaporizhzhia: ZDIA. – 2014. – s. 222.

41. Alekseevskiy D. Investigation of the Supernominal Power Throws Factors on the Wind Turbine With Variable Speed / D. Alekseevskiy, O. Pankova, A. Alyekseev, K. Turyshev, S. Shmaliy // 2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS). – Kharkiv. – 2018. – P. 172–175.

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП</b> .....	6
<b>РОЗДІЛ 1. СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК З АЕРОДИНАМІЧНИМ МУЛЬТИПЛІКУВАННЯМ</b> .....	14
1.1. ВЕУ з АДМ як альтернативний напрям побудови вітроелектрогенеруючих систем.....	14
1.2. Огляд відомих схем ВЕУ з АДМ.....	31
1.3. Аналіз схем ВЕУ з аеродинамічним мультиплікуванням на структурному рівні перетворення потужності.....	37
1.4. Огляд методів аналізу властивостей електромеханічних систем ВЕУ з АДМ.....	43
1.5. Стан розвитку теорії електромеханічних систем ВЕУ з АДМ.....	51
1.6. Постановка завдання дослідження .....	57
<b>РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ПІДХОДИ ДО АНАЛІЗУ ПРОЦЕСІВ У ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІЙ СИСТЕМІ ВЕУ З АДМ</b> .....	59
2.1. Візуальна математична модель ВЕУ з АДМ.....	59
2.2. Узагальнена модель ВЕУ з АДМ.....	68
2.2.1. Базисні величини.....	68
2.2.2. Відносні величини.....	70
2.2.3. Основні співвідношення.....	75
2.3. Передавальна функція ідеалізованого об'єкту управління для одноканальної ВЕУ з АДМ.....	80
2.4. Передавальна матриця ідеалізованого об'єкту управління для багатоканальної ВЕУ з АДМ .....	94
2.4.1. Вихід за рамки прийнятих припущень.....	94
2.4.2. Модель триканальної ланки аеродинамічного перетворення.....	95
2.4.3. Визначення коефіцієнтів лінеаризації.....	100
2.4.4. Визначення передавальної матриці ланки електромеханічного перетворення.....	102
2.5. Режим автооптимізації електромеханічної системи ВЕУ з АДМ.....	103

2.5.1. Обґрунтування залежності кутової швидкості первинної вітротурбіни від швидкості первинного вітрового потоку, яка забезпечує оптимальний відбір потужності.....	103
2.5.2. Гіпотеза про квазіоптимальний режим.....	104
2.5.3. Опис системи з аеродинамічним мультиплікуванням в просторі $P^*(\omega_1^*, V_1^*)$ .....	105
2.6. Перетворення потужності у ВЕУ з АДМ. Проблема визначення коефіцієнта потужності.....	110
2.7. Висновки до розділу.....	116
<b>РОЗДІЛ 3. МЕТОДИКА СИНТЕЗУ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ ВЕУ З АДМ.....</b>	<b>118</b>
3.1. Особливості побудови моделі.....	120
3.2. Візуально-блочне моделювання електромеханічної системи ВЕУ з АДМ.....	122
3.3. Компоненти бібліотеки візуально-блочного моделювання електромеханічної системи ВЕУ з АДМ.....	125
3.3.1. Напівпровідникові випрямлячі.....	126
3.3.2. Напівпровідникові перетворювачі постійної напруги.....	136
3.3.3. Електромеханічні перетворення.....	150
3.3.4. Напівпровідниковий інвертор.....	158
3.3.5. Аеромеханічне перетворення.....	160
3.4. Представлення електромеханічної системи ВЕУ з АДМ у формі моделі у змінних стану .....	168
3.5. Висновки до розділу.....	181
<b>РОЗДІЛ 4. СИНТЕЗ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ ВЕУ З АДМ .....</b>	<b>183</b>
4.1. Засоби задавання режиму роботи електромеханічної системи ВЕУ з АДМ.....	183
4.2. Структура та алгоритм управління САУ ВЕУ з АДМ з моментним управлінням.....	188

4.3. Синтез модального регулятора кутової швидкості первинної вітротурбіни.....	193
4.4. Дослідження властивостей САУ ВЕУ з АДМ з моментним управлінням.....	197
4.4.1. Підтвердження працездатності алгоритму моментного управління ВЕУ з АДМ.....	197
4.4.2. Визначення впливу параметрів первинного повітряного потоку на величину викидів вихідної потужності при реалізації алгоритму моментного управління ВЕУ з АДМ.....	198
4.4.3. Визначення впливу параметрів первинного повітряного потоку на величину видобутку електроенергії при реалізації алгоритму моментного управління ВЕУ з АДМ.....	201
4.5. Висновки до розділу .....	203
<b>РОЗДІЛ 5. ВИБІР ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ ВЕУ З АДМ.....</b>	<b>205</b>
5.1. Електрообладнання для ВЕУ з АДМ.....	205
5.2. Опис ВЕУ ТГ-1000.....	211
5.3. Опис математичної моделі електромеханічної системи ВЕУ ТГ-1000.....	214
5.4. Вплив ККД вторинної вітротурбіни на оптимальні значення кутової швидкості обертання генератору.....	216
5.5. Вплив ККД вторинної вітротурбіни на оптимальні значення кута нахилу вісі генератору відносно площини обертання первинної вітротурбіни.....	218
5.6. Вплив швидкості первинного повітряного потоку на оптимальні значення кутової швидкості обертання генератору.....	221
5.7. Вплив швидкості первинного потоку на оптимальні значення кута нахилу вісі генератору відносно площини обертання первинної вітротурбіни.....	223

5.8. Двопараметрична оптимізація режимів ВЕУ з АДМ по кутовій швидкості генератору та куту нахилу вісі генератору.....	226
5.9. Висновки до розділу.....	227
<b>РОЗДІЛ 6. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ З АЕРОДИНАМІЧНИМ МУЛЬТИПЛІКУВАННЯМ.</b>	<b>228</b>
6.1. Опис експериментальної вітроенергетичної установки з аеродинамічним мультиплікуванням.....	228
6.2. Синтез САУ для експериментальної вітроенергетичної установки з аеродинамічним мультиплікуванням.....	234
6.3. Результати дослідження поведінки електромеханічної системи експериментальної ВЕУ з АДМ.....	235
6.4. Імітація аеромеханічної системи вітроенергетичної установки з аеродинамічним мультиплікуванням.....	237
6.5. Висновки до розділу.....	241
<b>ВИСНОВКИ</b> .....	<b>243</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ</b> .....	<b>246</b>
<b>ДОДАТОК А. СИСТЕМА ПОЗНАЧЕНЬ СЕТ</b> .....	<b>274</b>
<b>ДОДАТОК Б. ВБМ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ ВЕУ З АДМ.</b>	<b>276</b>
<b>ДОДАТОК В. ОПИС ТИПОВИХ ЕЛЕМЕНТІВ БІБЛІОТЕКИ ВІЗУАЛЬНО-БЛОЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ</b> .....	<b>292</b>
<b>ДОДАТОК Г. АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ</b> .....	<b>296</b>
<b>ДОДАТОК Д. ПКЕ ТА КС ДЛЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ ВЕУ З АДМ</b> .....	<b>300</b>
<b>ДОДАТОК Е. СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ ТА АПРОБАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ</b> .....	<b>302</b>