

Міністерство освіти і науки України
Національний університет «Одеська морська академія»

Вишневський Дмитро Леонідович

АНОТАЦІЯ

до дисертації на тему

ЦИФРОВІ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ НАПРУГОЮ СУДНОВОЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ

Спеціальність 271 – Морський та внутрішній водний транспорт

Галузь знань 27 – Транспорт

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



Дмитро Вишневський

Науковий керівник:
Муха Микола Йосифович,
доктор технічних наук, професор

Одеса – 2025

АНОТАЦІЯ

Вишневський Д.Л. Цифрові системи керування напругою суднової електроенергетичної системи. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 271 – «Морський та внутрішній водний транспорт» (Галузь знань 27 – Транспорт). – Національний університет «Одеська морська академія», Одеса, 2025.

Вдосконалення автономних енергетичних установок суден та інших транспортних об'єктів, покращення їх техніко-економічних показників є основною тенденцією розвитку суднобудування та автономної енергетики. Вибір оптимального складу суднової електростанції з покращеними експлуатаційними якостями сприяє підвищенню ефективності енергетичної установки загалом.

На морських судах як джерела електроенергії поширені синхронні генератори, що пояснюється простотою регулювання їх напруги. Багатовиткова обмотка збудження на роторі генератора дозволяє керувати напругою синхронного генератора за допомогою відносно невеликих струмів. Ця простота викликала дві інші проблеми: контактні кільця, що обертаються на роторі і велику індуктивність кола збудження, що значно знизило швидкодію системи стабілізації напруги. Сучасні безконтактні синхронні генератори з оберненим збудником і діодами, що обертаються, дозволили усунути контактні кільця, проте значно ускладнили їх конструкцію. Проблемним завданням є включення та стійкість паралельної роботи синхронних генераторів до суднової багатогенераторної електростанції.

Одним із шляхів модернізації електроенергетичної системи є застосування асинхронних генераторів (АГ) із конденсаторним збудженням. Управління напругою асинхронного генератора здійснюється у статорному колі його навантаження, тому інерційність каналів управління та збурення однакові, що дозволяє реалізувати швидкодіючу систему стабілізації напруги. Демпфуючі

властивості короткозамкнутого ротора роблять багатогенераторну установку стійкою, знижуються обмінні коливання та ударні моменти несинхронного включення. Додаткові конденсаторні блоки, необхідні для роботи асинхронних генераторів, одночасно компенсують реактивну потужність суднового навантаження, знижуючи на 20 % струми і встановлену потужність електрогенераторів.

Над використанням асинхронних генераторів на судах працюють провідні судноплавні компанії, наприклад MSC Shipmanagement Ltd та CSL Group Inc. Перспективним є використання асинхронної машини як валодвигуна або валогенератора у відповідних режимах роботи енергетичної установки судна.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота проводилась згідно з положеннями Транспортної стратегії України до 2030 року (КМУ 30.03.18 р. № 430-р).

Автор приймає участь в держбюджетних науково-дослідницьких роботах кафедри електричної інженерії та електроніки НУ «ОМА».

1. НДР № ДР 0116U002392 «Підвищення ефективності роботи суднових електроенергетичних та електромеханічних систем» (2016 – 2020 р.р.). У заключному звіті аспірант виконав підрозділи 3.1 – 3.8 в розділі 3. «ВАРІАНТ ПЕРСПЕКТИВНОЇ КОМПОНОВКИ СУДНОВОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ».

2. НДР № ДР 0122U201978 «Технології підвищення енергоефективності суднових електроенергетичних і електромеханічних установок», (2022 – 2026 рр.).

Робота дисертанта базується на науково-дослідницьких роботах колективу Національного університету «Одеська морська академія» та є їх продовженням з урахуванням сучасних досягнень комп'ютерної та напівпровідникової техніки.

Метою дослідження є підвищення енергоефективності суднової електростанції з конденсаторним керуванням напругою асинхронних генераторів.

Основна наукова гіпотеза дисертації полягає в доцільності впровадження цифрового керування напругою асинхронного генератора з конденсаторним збудженням у суднових електроенергетичних системах.

Головним завданням наукового дослідження є пошук ефективних принципів та розробка цифрових законів управління напругою асинхронних генераторів (АГ).

Допоміжні завдання роботи:

1. Пошук та оптимізація способу керування напругою АГ.
2. Дослідження цифрових законів стабілізації напруги АГ.
3. Розробка датчика трифазної напруги для системи керування напругою асинхронного генератора.
4. Удосконалення математичної моделі системи цифрового керування АГ.

На захист виносяться наступні **наукові результати дисертації**.

1. **Вперше** запропонований спосіб керування напругою асинхронного генератора шляхом комутації блоків конденсаторів, який відрізняється від відомих способів керування з пропорційним законом керування тим, що формує двійкове число, розряди якого управляють комутацією конденсаторів. Ємність конденсаторів пропорційна вазі розрядів керуючого числа, яке у поточний період струму змінюється на величину, пропорційну відхилення напруги від заданого значення за попередній період за винятком певної зони нечутливості. Це дозволяє уникнути автоколивань напруги в сталому режимі та покращити якість електроенергії.

2. **Вперше** розроблений датчик трифазної напруги, який на відміну від відомих датчиків, що інтегрують, виконує диференціювання, випрямлення та інтегрування фазних напруг. Це дозволяє визначити напругу яка значно менше залежить від частоти струму, ніж у відомих датчиків. Запропонований датчик є складовою системи керування напругою асинхронного генератора.

3. **Удосконалена** математична модель суднової електроенергетичної системи з асинхронним генератором, яка вперше враховує процеси комутації кожного фазного конденсатора цифрового регулятора що дозволяє детальніше досліджувати та оптимізувати закони керування напругою.

4. **Вперше** визначено кращу за швидкодією систему стабілізації напруги асинхронного генератора з конденсаторним збудженням шляхом порівняння дискретних регуляторів, які працюють за принципом відхилення з інтегральним, диференціальним та пропорційним законами, з форсуванням збудження та за принципом збурення з електричного навантаження.

Практичне значення роботи полягає в наступному:

1. Розроблений та запатентований спосіб цифрового керування напругою асинхронного генератора з конденсаторним збудженням реалізований на експериментальному макеті та досліджений на комп'ютерній моделі суднового генераторного комплексу. Дослідження показали співпадіння розрахункових та експериментальних результатів.

2. Дослідження типових перехідних процесів у розробленій системі цифрового керування напругою повністю відповідають вимогам Міжнародних Стандартів і Морського Регістру Судноплавства до параметрів перехідних процесів у судновій електростанції. Швидкодія компенсації динамічних відхилень напруги при комутації типового активно-індуктивного навантаження суднової електростанції з асинхронним генератором складає 2..5 періодів струму.

3. Доопрацювання математичної моделі генераторного комплексу з комутуваними блоками конденсаторів в подальшому дозволить детально досліджувати процеси компенсації реактивної потужності навантаження суднової електростанції та аналізувати процеси стабілізації напруги генератора з різними алгоритмами управління.

4. Дослідження та реалізація датчика трифазної напруги на контролері, який вимірює середнє значення напруги впродовж напівперіоду струму, дозволяє реалізувати швидкодіючі системи керування напругою.

5. Як показали дослідження, конденсаторна система може компенсувати реактивну потужність та керувати напругою в синхронних генераторах в колі статора, у тому числі в гідро- та вітрогенераторах.

Ключові слова: Цифрова система, керування напругою, суднова електроенергетична система, дизель-генератор, асинхронний генератор, ємнісне збудження, реактивна потужність, конденсаторна система самозбудження, математична модель, програмований логічний контролер, вимірювання параметрів генератора, датчик трифазної напруги, способи керування напругою, цифрові закони керування, експериментальна установка.

Основні наукові результати опубліковані:

1. Вишневський Д.Л. Цифровий регулятор напруги асинхронного генератора // Електротехнічні та комп'ютерні системи.– К.: Техніка, 2014.–№15 (91) .– С. 277-281. (російською)

2. Вишневський Д.Л. Оптимізація закону регулювання напруги асинхронного генератора // Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит, 2014.– №12 (131) .– С. 40-46. (російською)

3. Vyshnevskiy L., Mukha M., Vyshnevskiy O., Vyshnevskiy D. Voltage Sensor of the Autonomous Generating Set // 2020 IEEE Proceedings of 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET-2020), Lviv-Slavske, Ukraine, February 25-29, 2020. – DOI: 10.1109/TCSET49122.2020.235525. – IEEE Xplore Digital Library.

4. Vyshnevskiy L., Mukha M., Vyshnevskiy O., Vyshnevskiy D. Measuring the Voltage of a Three-Phase Circuit in a Generator Set Control System // TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, 2021.– Vol.15.– No. 4. – doi:10.12716/1001.15.04.21.– pp.877-881.

5. Vyshnevskiy L., Mukha M., Vyshnevskiy D. Discrete-Pulse Voltage Control of an Asynchronous Generator // 2021 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES), Kremenchuk, September 2021. DOI:10.1109/MEES52427.2021.9598478, https://www.researchgate.net/publication/356279404_Discrete-Pulse_Voltage_Control_of_an_Asynchronous_Generator

6. Vyshnevskiy L., Mukha M., Vyshnevskiy D., Drankova A. Discrete Laws of Capacitor Control of Asynchronous Generator Voltage // TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, 2024.–Vol.18.–No.3.–

DOI: 10.12716/1001.18.03.24.–pp.689-693.

7. Патент №113039 С2, UA, H02P9/46, Спосіб керування напругою асинхронного генератора // Вишневський Л.В., Вишневський Д.Л. / Опубл. в Бюл.№ 22 . – 25.11.2016.

Особистий внесок здобувача.

Наукові праці [1] та [2] виконані самостійно. У наукових роботах, які опубліковані у співавторстві, дисертанту особисто належить наступне: [3] та [4] – моделювання та макетування запропонованих способів та схем датчика трифазної напруги; [5] та [6] – програмування комп'ютерної моделі генераторного комплексу, аналіз та порівняння результатів моделювання способів та законів керування; [7] – патентний пошук, моделювання, розробка та налаштування експериментальних макетів регулятора напруги.

Апробація, участь в конференціях.

1. Вишневський Д.Л., Муха М.Й. Перспективи використання конденсаторної системи управління в складі суднової електростанції // Матеріали Х міжнародної науково-технічної конференції «Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика», Одеса: НУ «ОМА», 2020. – С. 48-49.

DOI:10.31653/2706-7874.SEEEA-2020.11.1-245.

2. Вишневський Д.Л., Муха М.Й. Експериментальні дослідження процесів стабілізації напруги асинхронного генератору // Матеріали XI міжнародної науково-технічної конференції «Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика», Одеса: НУ «ОМА», 2021. – С. 55-57.

DOI:10.31653/2706-7874.SEEEA-2021.11.1-238.

3. Вишневський Д.Л., керівник Муха М.Й. Датчик напруги автономної генераторної установки // Матеріали II науково-технічної конференції молодих вчених «Інновації та технології на морському та внутрішньому водному транспорті», Одеса: НУ «ОМА», 2023. – С. 18-20.

4. Vyshnevskyi L., Mukha M., Vyshnevskyi D., Drankova A., Borysenkov I. Discrete-pulse Control of Reactive Power Compensation in Ship Power Plants // 2024 IEEE 6th International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES),

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Ukraine, September 18-21, 2024. – <https://mees.ieee.org.ua>.

Впровадження дисертаційного дослідження.

Наукові результати роботи впроваджені в рекомендації та висновки держбюджетних науково-дослідницьких робіт кафедри електричної інженерії та електроніки НУ «ОМА»: НДР № ДР 0116U002392 «Підвищення ефективності роботи суднових електроенергетичних та електромеханічних систем» (2016 – 2020 р.р.) та НДР № ДР 0122U201978 «Технології підвищення енергоефективності суднових електроенергетичних і електромеханічних установок» (2022 – 2026 рр.).

Експериментальний стенд АГ та запрограмовані контролери використовуються в дослідженнях систем конденсаторного збудження генераторів та в системах компенсації реактивної потужності навантаження суднової електростанції. Розроблені математичні та комп'ютерні моделі використовуються в навчальному процесі підготовки магістрів університету.

Наукові рекомендації дисертанта впроваджені та враховуються судноплавними та суднобудівними компаніями при замовленні, проектуванні, експлуатації та ремонті суден.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з вступу, п'яти розділів, висновків, переліку використаних джерел та додатків.

Обсяг дисертаційної роботи становить 154 сторінки, перелік використаних джерел із 108 найменувань, 3 додатка, 61 рисунок, 4 таблиці.

ABSTRACT

Vyshnevskiy D. "Digital voltage control systems of the ship's electrical power systems."

Qualification research paper presented as a manuscript. Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in the specialty 271 – "Marine and inland water transport" (Field of knowledge 27 – Transport). National University "Odessa Maritime Academy", Odesa, 2025.

The improvement of autonomous power plants of ships and other transport objects and the enhancement of their technical and economic indicators is a major trend in the development of shipbuilding and autonomous power engineering. Selecting the optimal composition of a ship's power plant with improved operational qualities enhances the overall efficiency of the power plant.

On marine vessels, synchronous generators are commonly used as power sources due to the simplicity of regulating their voltage. However, this simplicity has led to other challenges, such as rotating contact rings on the rotor and high inductance of the excitation circuit, which significantly reduces the response speed of the voltage stabilization system. Modern contactless synchronous generators with reverse excitation and rotating diodes have eliminated contact rings but have significantly complicated their design. The inclusion and stability of the parallel operation of synchronous generators in multi-generator ship power plants remain problematic.

One way to modernize the power plant is to use asynchronous generators (AG) with capacitive excitation. Voltage control of an asynchronous generator is carried out by the stator load circuit, allowing an almost invariant voltage stabilization system to be implemented. The damping properties of a squirrel-cage rotor make the multi-generator installation stable, reducing exchange oscillations and impact moments of non-synchronous inclusion. Additional capacitor blocks required for the operation of asynchronous generators simultaneously compensate for the reactive power of the ship's load, reducing currents and the installed power of electrical generators by 20%.

Leading shipping companies, such as MSC Shipmanagement Ltd and CSL Group Inc., are working on the use of asynchronous generators on ships. It is promising to use

an asynchronous machine as a shaft motor or shaft generator in the appropriate operating modes of the ship's power plant.

Research Connection with Scientific Programs, Plans, and Topics. The work was carried out in accordance with the provisions of Ukraine's Transport Strategy until 2030 (Cabinet of Ministers of Ukraine, March 30, 2018, No. 430-p). The author participates in budget-funded scientific research projects of the Department of Electrical Engineering and Electronics at the National University "Odessa Maritime Academy."

Research Project No. DR 0116U002392 "Improving the Efficiency of Ship Power Plants and Electromechanical Systems" (2016–2020). The graduate student completed sections 3.1 – 3.8 in Chapter 3 "Option for a Prospective Ship Power Plant Layout."

Research Project No. DR 0122U201978 "Technologies for Improving the Energy Efficiency of Ship Power Plants and Electromechanical Systems" (2022–2026).

The research work of the dissertation is based on the scientific research carried out by the team of the National University "Odessa Maritime Academy" and continues it, taking into account modern achievements in computer and semiconductor technology.

Research Objective: The aim is to improve the energy efficiency of a ship's power plant with voltage control of asynchronous generators.

Scientific Hypothesis: The dissertation's main scientific hypothesis is the feasibility of implementing a digitally voltage-controlled asynchronous generator with capacitor excitation in ship power plants.

Main Research Task: Search for effective principles and develop digital voltage control laws for asynchronous generators (AG).

Auxiliary tasks:

1. Search and optimization of the AG voltage control method.
2. Research of digital laws of AG voltage stabilization.
3. Development of a three-phase voltage sensor for an asynchronous generator voltage control system.
4. Improvement of the mathematical model of the AG digital control system.

Scientific results submitted for defense:

1. For the first time, a method of controlling the voltage of an asynchronous generator by switching capacitor blocks has been proposed, which differs from known control methods with a proportional control law in that it forms a binary number, the discharges of which control the switching of capacitors. The capacitance of the capacitors is proportional to the weight of the discharges of the control number, which in the current current period changes by an amount proportional to the voltage deviation from the set value for the previous period, with the exception of a certain dead zone. This allows you to avoid voltage self-oscillations in a steady state and improve the quality of electricity.

2. For the first time, a three-phase voltage sensor has been developed, which, unlike known integrating sensors, performs differentiation, rectification and integration of phase voltages. This allows determining the voltage, which is much less dependent on the current frequency than known sensors. The proposed sensor is a component of the voltage control system of an asynchronous generator.

3. An improved mathematical model of a ship's electric power system with an asynchronous generator, which for the first time takes into account the switching processes of each phase capacitor of a digital regulator, which allows for a more detailed study and optimization of voltage control laws.

4. For the first time, the best-in-class voltage stabilization system for an asynchronous generator with capacitor excitation has been determined by comparing discrete regulators that operate on the principle of deviation with integral, differential, and proportional laws, with excitation forcing, and on the principle of disturbance from an electrical load.

Practical significance of the study:

1. The developed and patented method of controlling the voltage of an asynchronous generator with capacitive excitation was implemented on an experimental model and tested on an computer model of the ship generator complex. The studies showed a match between the calculated and experimental results.

2. The study of typical transient processes in the developed voltage control system fully meets the requirements of International Standards and the Maritime Register of Shipping for the parameters of transient processes in a ship power plant. The speed of compensation for dynamic voltage deviations when switching a typical active-inductive load of a ship power plant with an asynchronous generator is 2-5 current periods, which is tens of times less than in installations with synchronous generators.

3. Further development of the mathematical model of the generator complex with switched capacitor banks will allow for a detailed study of the processes of compensation of the reactive power of the ship's power plant load and an analysis of the processes of generator voltage stabilization with various control algorithms.

4. Research and implementation of a three-phase voltage sensor on a controller that measures the average voltage value during the current half-cycle allows for the implementation of high-speed voltage control systems.

5. As studies have shown, a capacitor system can compensate for reactive power and control voltage in synchronous generators along the stator circuit, including hydro and wind generators.

Keywords: Digital system, voltage control, ship electrical power system, diesel generator, asynchronous generator, capacitive excitation, reactive power, capacitor self-excitation system, mathematical model, programmable logic controller, generator parameter measurement, three-phase voltage sensor, voltage control methods, digital control laws, experimental installation.

Scientific results published:

1. Вишневський Д.Л. Цифровий регулятор напруги асинхронного генератора // Електротехнічні та комп'ютерні системи.— К.: Техніка, 2014.—№15 (91) .— С. 277-281. (RU)

2. Вишневський Д.Л. Оптимізація закону регулювання напруги асинхронного генератора // Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит, 2014.— №12 (131) .— С. 40-46. (RU)

3. Vyshnevskiy L., Mukha M., Vyshnevskiy O., Vyshnevskiy D. Voltage Sensor of the Autonomous Generating Set // 2020 IEEE Proceedings of 15th International

Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET-2020), Lviv-Slavske, Ukraine, February 25-29, 2020. – DOI: 10.1109/TCSET49122.2020.235525. – IEEE Xplore Digital Library.

4. Vyshnevskiy L., Mukha M., Vyshnevskiy O., Vyshnevskiy D. Measuring the Voltage of a Three-Phase Circuit in a Generator Set Control System // TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, 2021. – Vol.15. – No. 4. – doi:10.12716/1001.15.04.21. – pp.877-881.

5. Vyshnevskiy L., Mukha M., Vyshnevskiy D. Discrete-Pulse Voltage Control of an Asynchronous Generator // 2021 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES), Kremenchuk, September 2021. DOI:10.1109/MEES52427.2021.9598478, https://www.researchgate.net/publication/356279404_Discrete-Pulse_Voltage_Control_of_an_Asynchronous_Generator

6. Vyshnevskiy L., Mukha M., Vyshnevskiy D., Drankova A. Discrete Laws of Capacitor Control of Asynchronous Generator Voltage // TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, 2024. – Vol.18. – No.3. – DOI: 10.12716/1001.18.03.24. – pp.689-693.

7. Патент №113039 С2, UA, H02P9/46, Спосіб керування напругою асинхронного генератора // Вишневецький Л.В., Вишневецький Д.Л. / Опубл. в Бюл.№ 22 . – 25.11.2016. (UA)

Personal contribution of the author.

Scientific works [1] and [2] were performed independently. In the scientific works published in co-authorship, the doctoral candidate personally owns the following: [3] and [4] - modeling and prototyping of the proposed methods and circuits of a three-phase voltage sensor; [5] and [6] - programming of a computer model of a generator complex, analysis and comparison of the results of modeling of methods and control laws; [7] - patent search, modeling, development and adjustment of experimental models of a voltage regulator.

Participation in conferences.

1. Вишневецький Д.Л., Муха М.Й. Перспективи використання конденсаторної системи управління в складі суднової електростанції // Матеріали

X міжнародної науково-технічної конференції «Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика», Одеса: НУ «ОМА», 2020. – С. 48-49. – DOI:10.31653/2706-7874.SEEEA-2020.11.1-245. (UA)

2. Вишневський Д.Л., Муха М.Й. Експериментальні дослідження процесів стабілізації напруги асинхронного генератору // Матеріали XI міжнародної науково-технічної конференції «Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика», Одеса: НУ «ОМА», 2021. – С. 55-57. – DOI:10.31653/2706-7874.SEEEA-2021.11.1-238. (UA)

3. Вишневський Д.Л., керівник Муха М.Й. Датчик напруги автономної генераторної установки // Матеріали II науково-технічної конференції молодих вчених «Інновації та технології на морському та внутрішньому водному транспорті», Одеса: НУ «ОМА», 2023. – С. 18-20. (UA)

4. Vyshnevskyi L., Mukha M., Vyshnevskyi D., Drankova A., Borysenkov I.

Discrete-pulse Control of Reactive Power Compensation in Ship Power Plants // 2024 IEEE 6th International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES), Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Ukraine, September 18-21, 2024. – <https://mees.ieee.org.ua>.

Implementation of dissertation research.

The scientific results of the work are implemented in the recommendations and conclusions of budget-funded scientific research projects of the Department of Electrical Engineering and Electronics at NU "OMA":

1. Research project No. ДР 0116U002392 «Підвищення ефективності роботи суднових електроенергетичних та електромеханічних систем» (2016 – 2020).
2. Research project No. ДР 0122U201978 «Технології підвищення енергоефективності суднових електроенергетичних і електромеханічних установок» (2022 – 2026).

Experimental AG stand and programmed controllers are used in research on capacitor excitation generator systems and reactive power compensation systems for ship power plant loads.

The developed mathematical and computer models are used in the training

process for preparing university master's students.

The scientific recommendations of the dissertation author are considered by shipping and shipbuilding companies in the design, operation, and repair of ships.

The structure and scope of the dissertation. The dissertation consists of an introduction, five chapters, conclusions, a list of used sources and appendices.

The volume of the dissertation is 154 pages, a list of used sources from 108 items, 3 appendices, 61 figures, 4 tables.