

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

Вишневський Дмитро Леонідович

АНОТАЦІЯ

до дисертації на тему

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СУДНОВОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ З АСИНХРОННИМИ ГЕНЕРАТОРНИМИ КОМПЛЕКСАМИ

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 Йосипович,
доктор технічних наук, професор

Одеса – 2024

Вишневецький Д.Л. Підвищення ефективності суднової електростанції з асинхронними генераторними комплексами. – 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, 2024.

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 ланцюга збудження, що значно знизило швидкодію системи стабілізації напруги. Сучасні безконтактні синхронні генератори зі зверненим збудником і діодами, що обертаються, дозволили усунути контактні кільця, проте значно ускладнили їх конструкцію. Проблемним є включення та стійкість паралельної роботи синхронних генераторів до суднової багатогенераторної електростанції.

Одним із шляхів модернізації електроенергетичної установки є застосування асинхронних генераторів (АГ) із конденсаторним збудженням. Управління напругою асинхронного генератора здійснюється за статорним ланцюгом навантаження, тому інерційність каналів управління та обурення однакові, що дозволяє реалізувати практично інваріантну 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.

Використання АГ перспективне, так як технології виробництва конденсаторів та силових напівпровідників значно знизили їх вартість та масогабаритні показники. Наукові дослідження в галузі розробки АГ та їх систем управління дозволять спростити конструкцію суднового генератора змінного струму, покращити економічні, електротехнічні та динамічні показники при автономній та паралельній роботі.

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» та є їх продовженням з урахуванням сучасних досягнень комп'ютерної та напівпровідникової техніки.

Метою дослідження є підвищення енергоефективності суднової

електростанції за рахунок впровадження асинхронних генераторів.

Основна наукова гіпотеза дисертації полягає в доцільності впровадження асинхронної машини в якості генератора з конденсаторним збудженням в суднових енергетичних установках.

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 швидкодіючого датчика трифазної напруги.
4. Удосконалення математичної моделі конденсаторного збудження АГ.

Об'єкт дослідження – процеси керування судновою електростанцією.

Предмет дослідження – система цифрового управління напругою АГ.

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

1. **Вперше** запропонований та реалізований цифровий спосіб керування напругою асинхронного генератора, що передбачає дискретну зміну ємнісного статорного струму генератора шляхом комутації N блоків конденсаторів за допомогою напівпровідникових ключів у моменти переходу напруги на ключах через нуль, де використовують N розрядне двійкове число, розряди якого управляють комутацією блоків конденсаторів, ємність яких пропорційна вазі розрядів керуючого числа, при цьому число змінюється один раз за період генеруемого струму на величину, пропорційну відхиленню напруги генератора за попередній період від заданого значення за винятком зони нечутливості, що більше відхилення напруги генератора, викликаного зміною керуючого числа на одиницю.

2. **Вперше** досліджений та розроблений швидкодіючий датчик трифазної напруги, що виконує диференціювання, випрямлення та інтегрування фазних напруг генератора, який є інваріантним до частоти струму, що дозволяє вимірювати середнє значення трифазної напруги

впродовж одного періоду генерованої напруги та використовувати його в системі керування генератором.

3. **Удосконалена** математична модель енергетичної генераторної установки з конденсаторним збудженням, що враховує процеси комутації фазних конденсаторів кожного розряду цифрового регулятора та обраного закону керування напругою генератора.

4. **Вперше** досліджені та оптимізовані за швидкодією цифрові принципи та закони керування напругою асинхронного генератора: за відхиленням – інтегральний та диференціальний, лінійний та з форсуванням збудження; за збуренням – по електричному навантаженню.

Практичне значення роботи полягає в наступному:

1. Розроблений та запатентований спосіб керування напругою асинхронного генератора з конденсаторним збудженням реалізований на експериментальному макеті потужністю 3 кВт та досліджений на доопрацьованій комп'ютерній моделі суднового генераторного комплексу. Дослідження показали співпадіння розрахункових та експериментальних результатів.

2. Дослідження типових перехідних процесів у розробленій системі 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, що в десятки разів менше, ніж в електроустановках з синхронними генераторами.

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

4. Дослідження та реалізація датчика трифазної напруги на дешевому контролері, який вимірює середнє значення напруги в робочому діапазоні частот впродовж одного періоду, дозволяє реалізувати швидкодіючі системи керування напругою суднової електростанції.

5. Розроблена система збудження та стабілізації напруги асинхронного генератора може знайти широке впровадження в суднових, транспортних та інших автономних електроустановках малої та середньої потужності, у тому числі на малих гідро та вітрогенераторних установках.

Основні наукові результати опубліковані:

1. Вишневский Д.Л. Цифровой регулятор напряжения асинхронного генератора // Электротехнические и компьютерные системы. – К.: Техника. – 2014. – №15(91). – С. 277 – 281.

2. Вишневский Д.Л. Оптимизация закона регулирования напряжения асинхронного генератора // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит . – 2014. – №12(131). – С. 40 – 46.

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 // 15th International Conference on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation TransNav 2023 Conference, 21-23 June 2023. Gdynia, Poland. – <http://transnav.umg.edu.pl/>.

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.

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. 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.

2. Вишневецький Д.Л., Муха М.Й. Експериментальні дослідження процесів стабілізації напруги асинхронного генератора // 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. Вишневецький Д.Л., керівник Муха М.Й. Датчик напруги автономної

генераторної установки // Матеріали ІІ науково-технічної конференції молодих вчених «Інновації та технології на морському та внутрішньому водному транспорті», Одеса: НУ «ОМА», 2023. – С. 18-20.

4.Vyshnevskiy L., Mukha M., Vyshnevskiy 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 Ostrohradskiy 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 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, 60 рисунків, 4 таблиці.

ABSTRACT

Vyshnevskiy D. "Improving the efficiency of ship power plants with asynchronous generator complexes."

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, 2024.

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%.

The use of AGs is promising because capacitor and power semiconductor production technologies have significantly reduced their cost and size-weight characteristics. Scientific research in the field of AG development and their control systems will simplify the design of a ship's AC generator and improve its economic, electrical, and dynamic performance during autonomous and parallel operation.

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 through the implementation of asynchronous generators.

Scientific Hypothesis: The dissertation's main scientific hypothesis is the feasibility of implementing an asynchronous machine as a generator with capacitive 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 AG voltage control methods.
2. Study of digital laws of AG voltage stabilization.
3. Development of a high-speed three-phase voltage sensor.
4. Improvement of the mathematical model of capacitive excitation AG.

Object of Study: processes of managing a ship's power plant.

Subject of Study: digital voltage control system for AG.

Scientific results submitted for defense:

1. **For the first time**, a digital method for controlling the voltage of an asynchronous generator is proposed and implemented, involving discrete changes in the capacitive stator current of the generator by switching N capacitor blocks using semiconductor keys at moments when the voltage across the keys crosses zero. An N-bit binary number controls the switching of the capacitor blocks, whose capacitances are proportional to the weights of the control number bits. The number changes once per period of the generated current by an amount proportional to the deviation of the generator voltage from the set value during the previous period, excluding the dead zone where the voltage deviation caused by changing the control number by one unit is greater.

2. **For the first time**, a high-speed three-phase voltage sensor was developed that performs differentiation, rectification, and integration of the generator's phase voltages. It is invariant to current frequency, allowing it to measure the average value of the three-phase voltage during one period of generated voltage and use it in the generator control system.

3. The mathematical model of the energy-generating installation with capacitive excitation **is improved**, considering the processes of switching the phase capacitors of each digit of the digital regulator and the chosen generator voltage control law.

4. **For the first time**, digital principles and laws for controlling the voltage of an asynchronous generator were investigated and optimized for speed: by

deviation – integral, differential linear, and excitation-boosting; by disturbance – by 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 with a capacity of 3 kW and tested on an improved 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. Refinement of the mathematical model of the generator complex with switched capacitor blocks allowed for a detailed study of the processes of compensating the reactive power of the ship's power plant load and a more accurate analysis of the voltage stabilization processes of the generator with different control algorithms.

4. The development and implementation of a three-phase voltage sensor on a low-cost controller that measures the average voltage value in the working frequency range within one period makes it possible to implement high-speed voltage control systems for a ship's power plant.

5. The developed excitation and voltage stabilization system for the asynchronous generator can be widely applied in ship transport and other autonomous power installations of small and medium capacities, including small hydro and wind generator installations.

Scientific results published:

1. Вишнеvский Д.Л. Цифровой регулятор напряжения асинхронного

генератора // Электротехнические и компьютерные системы. – К.: Техника. – 2014. – №15(91). – С. 277 – 281.

2. Вишне夫斯基 Д.Л. Оптимизация закона регулирования напряжения асинхронного генератора // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит . – 2014. – №12(131). – С. 40 – 46.

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 // 15th International Conference on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation TransNav 2023 Conference, 21-23 June 2023. Gdynia, Poland. – <http://transnav.umg.edu.pl/>.

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.

Personal contribution of the author.

The scientific papers [1] and [2] were completed independently.

In scientific papers published in co-authorship, the following are the personal contributions of the dissertation author:

[3] and [4]: Modeling and prototyping of the proposed methods and circuits of the three-phase voltage sensor;

[5] and [6]: Programming of the computer model of the generator complex, analysis, and comparison of simulation results of control methods and laws;

[7]: Patent search, modeling, development, and adjustment of experimental prototypes of the voltage regulator.

Participation in conferences.

1. Вишневецький 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. Вишневецький Д.Л., Муха М.Й. Експериментальні дослідження процесів стабілізації напруги асинхронного генератору // Матеріали ХІ 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. Вишневецький Д.Л., керівник Муха М.Й. Датчик напруги автономної генераторної установки // Матеріали ІІ 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>.

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, 60 figures, 4 tables.