

Міністерство освіти і науки України

Національний університет «Одеська морська академія»

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

Вишневський Дмитро Леонідович

УДК 621.313.332

ДИСЕРТАЦІЯ

**ЦИФРОВІ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ НАПРУГОЮ СУДНОВОЇ
ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ**

Спеціальність 271 – Морський та внутрішній водний транспорт

Галузь знань 27 – Транспорт

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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. Vyshnevskyi L., Mukha M., Vyshnevskyi O., Vyshnevskyi 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. Vyshnevskyi L., Mukha M., Vyshnevskyi O., Vyshnevskyi 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. Vyshnevskyi L., Mukha M., Vyshnevskyi 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. Vyshnevskyi L., Mukha M., Vyshnevskyi 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. Vyshnevskyi L., Mukha M., Vyshnevskyi O., Vyshnevskyi 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. (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. Вишневський 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.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	18
1. ОГЛЯД НАУКОВО-ТЕХНІЧНИХ ПРОБЛЕМ ВИКОРИСТАННЯ АСИНХРОННИХ ГЕНЕРАТОРІВ У СУДНОВИХ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМАХ	25
1.1 Проблеми використання асинхронних генераторів із конденсаторним збудженням на судах	25
1.2 Технічні вимоги до характеристик, параметрів та перехідних процесів у суднових електроагрегатах	28
1.3 Особливості дослідження суднових електроенергетичних систем	32
1.4 Оцінка ефективності використання асинхронних генераторів на судах	33
1.5 Технологічна карта дослідження	43
2. МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ АСИНХРОННИМИ ГЕНЕРАТОРАМИ	44
2.1 Склад та структура математичної моделі електроенергетичної системи	44
2.2 Моделювання генератора змінного струму	46
2.3 Моделювання асинхронного генератора	51
2.4 Моделювання кривої намагнічування	52
2.5 Моделювання навантаження електроустановки	56
2.6 Моделювання систем збудження асинхронних генераторів	58
2.7 Моделювання приводного двигуна генераторної установки	64
3. ДОСЛІДЖЕННЯ ДИСКРЕТНО-ІМПУЛЬСНИХ ЗАКОНІВ СТАБІЛІЗАЦІЇ НАПРУГИ АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА	68
3.1 Аналіз способів керування напругою асинхронного генератора	69
3.2 Розробка способу дискретно-імпульсної стабілізації напруги асинхронної генераторної установки	70
3.3 Аналіз та оптимізація дискретних законів управління напругою асинхронної генераторної установки	81
4. ВИМІР НАПРУГИ ДЛЯ УПРАВЛІННЯ АСИНХРОННИМ ГЕНЕРАТОРОМ	90
4.1 Швидкодіючі датчики трифазної напруги	91
4.2 Цифровий датчик трифазної напруги	103

4.3 Аналоговий датчик трифазної напруги для системи стабілізації напруги асинхронного генератора.....	106
5. РЕАЛІЗАЦІЯ ДИСКРЕТНОГО ІНТЕГРАЛЬНОГО РЕГУЛЯТОРА НАПРУГИ АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА З КОНДЕНСАТОРНИМ ЗБУДЖЕННЯМ	110
5.1 Дискретний датчик трифазної напруги для регулювання напруги асинхронного генератора.....	110
5.2 Дискретний інтегральний регулятор напруги асинхронного генератора з конденсаторним збудженням	116
5.3 Експериментальні дослідження на лабораторному стенді асинхронного генератора.....	119
ВИСНОВКИ	129
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	131
ДОДАТОК А - Програма моделювання асинхронного генераторного комплексу	143
ДОДАТОК Б - Програма реалізації вимірювання та регулювання трифазної напруги асинхронного генератора на контролері Arduino Uno	148
ДОДАТОК В - Акти впровадження результатів дисертаційної роботи	152

ВСТУП

Актуальність теми. 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.

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. Vyshnevskyi L., Mukha M., Vyshnevskyi O., Vyshnevskyi 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 Mykhailo Ostrohradskyi National University, 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

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. 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 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 р.р).

Математичні та комп'ютерні моделі, експериментальний стенд АГ та запрограмовані контролери використовуються в навчальному процесі та дослідженнях систем конденсаторного збудження генераторів та компенсації реактивної потужності навантаження суднової електростанції.

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, 61 рисунок, 4 таблиці.

1. ОГЛЯД НАУКОВО-ТЕХНІЧНИХ ПРОБЛЕМ ВИКОРИСТАННЯ АСИНХРОННИХ ГЕНЕРАТОРІВ У СУДНОВИХ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМАХ

1.1 Проблеми використання асинхронних генераторів із конденсаторним збудженням на судах

Розглянемо деякі технічні та наукові проблеми, що обмежили застосування асинхронних генераторів у суднових електростанціях.

1. Необхідність джерела реактивної потужності в ланцюзі статора генератора для його збудження та керування напругою.

2. Вибір конструкції та розрахунок параметрів асинхронного генератора для забезпечення режимів роботи суднових електростанцій.

3. Вибір джерела реактивної потужності та законів керування напругою асинхронного генератора з необхідними показниками.

4. Розробка алгоритмів ефективного керування режимами роботи суднової електростанції, що містить асинхронні генератори.

5. Ефективне керування типовими режимами роботи суднової електроустановки з асинхронним генератором.

Ці науково-технічні проблеми визначають напрями досліджень та розробок щодо впровадження асинхронних генераторів.

1. Ідея та можливість використання асинхронної машини в генераторному режимі описана в технічній літературі в першій половині минулого століття. До цього часу існує дві версії процесу самозбудження асинхронного генератора: м'якого (параметричного) і жорсткого (вимушеного) початкового збудження.

Вивчався вплив залишкового намагнічування як ротора, і статора генератора на тимчасові параметри самозбудження, досліджено самозбудження генератора з немагнітним ротором, [1 - 11].

Технічно необхідно вирішити задачу стійкого самозбудження асинхронного генератора після знеструмлення та втрати намагнічування основного контуру

магнітного потоку в результаті коротких замикань, перевантаження або тривалої стоянки в неробочому стані [12-14].

Фізико-математичному опису процесу самозбудження асинхронного генератора та встановлення постійної амплітуди напруги, що генерується, присвячені роботи [9, 15-19].

Розроблено та описано адекватні математичні моделі системи збудження генератора з урахуванням змінного намагнічування сталі машини, [20-29]. Апроксимація кривої намагнічування асинхронного генератора в математичних моделях визначає точність розрахунків усталених і перехідних процесів, [9, 18, 24, 25, 27].

Для вирішення завдань автоматичного управління знайдені вирази передавальних функцій та коефіцієнтів передачі асинхронного генератора поблизу режиму, що встановився, по каналах ємнісного збудження, частоти обертання та навантаження, [30-32].

2. Вибір конструктивних та електротехнічних параметрів асинхронної машини формує бажані навантажувальні та інші електротехнічні характеристики генератора, [33-36].

Аналіз характеристик генератора за різних параметрів короткозамкнутого ротора виконаний у роботі [37]. Вибір конструктивних рішень залежно від областей використання електроустановки запропоновано у роботі [38].

Розрахунки встановлених і динамічних режимів виконуються в основному на двох типах розрахункових моделей, заснованих на диференціальних рівняннях напруг, струмів і потокозчеплень статора і ротора електричної машини [20-29, 35, 39-41], а також на рівняннях балансу в схемах заміщення асинхронних машин і конденсаторів у вигляді комплексних опорів контуру намагнічування, розсіювання обмоток та навантаження [8, 10, 34, 42-46].

3. Істотний прогрес у виробництві поліпропіленових плівкових конденсаторів змінного струму [47] змінив масогабаритні та вартісні показники систем компенсації реактивної потужності, необхідних для керування напругою

асинхронних генераторів. З'явилися сегнетоелектричні конденсатори із змінною ємністю - вариконди [48, 49].

Для аналогової зміни керуючого реактивного струму розроблені дроселя зі змінною індуктивністю [50].

Для формування жорсткіших навантажувальних характеристик асинхронного генератора виконують підмагнічування магнітного кола генератора зміни його індуктивності [43, 50, 51]. Для стабілізації напруги пропонується використання баластних керованих резисторів у навантаженні генератора [52].

Ефективним технічним вирішенням проблеми керованого джерела реактивної потужності є розробка багатосекційного блоку трифазних конденсаторів, що комутуються напівпровідниковими ключами. Розроблено схеми включення конденсаторів без їх перезаряджання в моменти комутації [50-60]. Важливим тут є вибір розрядності цифрового регулятора реактивного струму [61].

4. Якісні перехідні процеси регулювання напруги передбачають швидкодіючий вимір трифазної напруги з урахуванням його несиметрії та нелінійності [53]. Важливим є вибір оптимального закону управління дискретним регулятором напруги та визначення настроювальних коефіцієнтів дискретного регулятора напруги [61-63, 93-97, 99]. Ефективним є застосування принципу регулювання навантаження в асинхронному генераторному комплексі [50].

5. У роботі [64] управління автономною роботою асинхронної електроустановки класифіковано: при постійній частоті обертання і при частоті обертання, що істотно змінюється [53, 65, 66].

Дослідження процесів пуску від асинхронного генератора потужних електродвигунів із компенсацією реактивної потужності присвячені роботи [53, 71-74]. Розглянуто керування включенням асинхронної електроустановки на паралельну роботу: з асинхронною генераторною установкою [53, 71]; із синхронною генераторною установкою [72]; із потужною мережею [50, 72]. Розподіл активної та реактивної потужності при паралельній роботі [73-74].

Забезпечення стійкості паралельної роботи [71-75]. Селективність захисту при коротких замикання електростанціях з асинхронними генераторами [67, 75, 76].

Основним напрямом роботи автора є дослідження щодо вирішення четвертої проблеми: розробка та вибір законів управління блоками конденсаторів та оптимізація їх параметрів [67, 68-70].

1.2 Технічні вимоги до характеристик, параметрів та перехідних процесів у суднових електроагрегатах

Нормативним документом для формулювання вимог будемо вважати комплекс стандартів: ISO 8528 «Електроагрегати генераторні змінного струму з приводом від двигуна внутрішнього згоряння», (ISO 8528 «Reciprocating internal combustion engine driven alternating current generating sets»).

Електроагрегати використовують як джерела безперервного електроживлення, живлення пікового навантаження і резервних джерел живлення.

Електроагрегат складається з поршневого двигуна внутрішнього згоряння, що виробляє механічну енергію, генератора, що перетворює механічну енергію на електричну, а також пристроїв для передачі механічної енергії, наприклад, муфт, коробки передач, частин монтажу.

До асинхронних генераторів із системами збудження пред'являються такі вимоги.

Асинхронні генератори генерують напругу за наявності реактивної потужності. При роботі електроагрегату в автономному режимі повинен бути спеціальний пристрій, що забезпечує збудження генератора та навантаження, підключеного до генератора, що має необхідну реактивну потужність.

Розрахункове ковзання асинхронного генератора $s_{r,G}$: різниця між синхронною частотою обертання магнітного поля і частотою обертання ротора, віднесена до синхронної частоти обертання, при якій електроагрегат видає номінальну активну потужність, що визначається за формулою

$$s_{r,G} = \frac{(f_r / p) - n_{r,G}}{f_{r,G} / p}$$

Діапазон регулювання напруги: час регулювання напруги асинхронного генератора за наявності керованого пристрою збудження.

Паралельна робота асинхронних генераторів: асинхронні генератори з вбудованими пристроями збудження, що працюють паралельно та розподіляють реактивну потужність, необхідну навантаженням, відповідно до потужності своїх систем збудження.

Розглянемо основні вимоги до систем автоматичного регулювання напруги та частоти обертання суднових електроенергетичних систем за Регістром судноплавства України та Міжнародної організації зі стандартизації.

1. Згідно з Регістром судноплавства України [82], система автоматичного регулювання напруги повинна відповідати наступним вимогам:

1.1 Кожний генератор змінного струму повинний мати окрему незалежну систему для автоматичного регулювання напруги, що забезпечують підтримку напруги в межах $\pm 2,5\%$ (аварійні генератори – $\pm 3,5\%$) від номінальної при зміні навантаження від нуля до номінального при номінальному коефіцієнті потужності.

1.2 Раптова зміна симетричного навантаження генератора, що працює при номінальній частоті обертання і номінальній напрузі, при наявному струмі і коефіцієнті потужності, не повинна викликати зниження напруги нижче 85% і підвищення понад 120% від номінального значення.

1.3 Після закінчення перехідних процесів напруга генератора повинна відновлюватися протягом не більше ніж 1,5 с і з відхиленням від номінального значення в межах $\pm 3\%$.

1.4 Для аварійних агрегатів ці значення можуть бути збільшені за часом до 5с і за напругою $\pm 4\%$ від номінального. У разі відсутності точних даних про максимальне раптове навантаження, що включається при наявному навантаженні генератора, можна застосовувати навантаження величиною 60% номінального струму з індуктивним коефіцієнтом потужності 0,4 і менше, яке включається під

час холостого ходу і потім виключається.

1.5 Для генераторів змінного струму відхилення від синусоїдальної форми напруги не повинне бути більше 5% від пікового значення основної гармоніки.

2. Згідно з Регістром судноплавства України [83], кожний головний двигун повинний мати регулятор, налаштований таким чином, щоб частота обертання двигуна не могла перевищити розрахункову (номінальну) частоту обертання більше ніж на 15%.

На додаток до регулятора кожний головний двигун потужністю 220кВт і більше, що може бути роз'єднаний із валопроводом або працює на ГРК, повинний мати окремий граничний вимикач, налаштований таким чином, щоб частота обертання двигуна не могла перевищити розрахункову частоту обертання більше ніж на 20%.

Кожний двигун, що приводить у дію генератор, повинний мати регулятор частоти обертання, характеристики якого повинні задовольняти вимогам:

2.1. при скиданні чи підвищенні максимального ступеня навантаження генератора зміна частоти у мережі не повинна перевищувати 10% розрахункової (номінальної);

2.2. при миттєвому підвищенні навантаження від нульового до 50% розрахункового навантаження генератора, а також при наступному (після досягнення сталої частоти обертання) підвищенні 50% навантаження генератора, що залишилися, короткочасна зміна частоти обертання двигуна не повинна перевищувати 10% розрахункової частоти обертання;

2.3. при будь-яких навантаженнях від нульового до 100% розрахункового навантаження генератора стала частота обертання двигуна не повинна перевищувати розрахункову більше ніж на 5%;

2.4. стала частота в мережі при скиданні чи підвищенні навантаження генератора, повинна досягатися не більше ніж за 5с;

2.5. стала частота обертання не повинна коливатися більше ніж на $\pm 1\%$ частоти обертання, що відповідає конкретному сталому навантаженню генератора;

2.6. для головних двигунів, що приводять в дію валогенератори, рівні скидання та підвищення навантаження, вказані в 2.1, 2.3, 2.4 повинні відповідати навантаженням двигунів;

2.7. при скиданні 100% навантаження генератора допускається зміна частоти обертання, що перевищує 10% розрахункової, але це не повинне бути причиною спрацювання захисту по перевищенню частоти обертання.

3. Оскільки Україна є членом Міжнародної організації зі стандартизації (англ. International Organization for Standardization, ISO) необхідним кроком також є розгляд вимог, які висуваються даною організацією до досліджуваних перехідних процесів.

Вимоги стандарту ISO 8528, пов'язані з системами автоматичного регулювання частоти та напруги приведені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 Вимоги до систем регулювання частоти та напруги

Клас точності	G1	G2	G3
Відхилення усталеної частоти	2.5 %	1.5 %	0.5 %
Максимальне падіння частоти	-15 %	-10 %	-7 %
Максимальне збільшення частоти	+18 %	+12 %	+10 %
Час перехідного процесу	10 Sec	5 Sec	3 Sec
Відхилення усталеної напруги	5 %	2.5 %	1 %
Максимальне падіння напруги	-25 %	-20%	-15 %
Максимальне збільшення напруги	+35 %	+25 %	+20%
Час перехідного процесу	10 Sec	6 Sec	4 Sec

В даному випадку нас цікавить стандарт ISO 8528 (BS7698) частина 6, який описує критерії для методів випробувань генераторних установок, які приводяться в дію двигуном внутрішнього згорання. Він встановлює загальні вимоги до випробувань і визначає функціональний і приймальний тест.

1.3 Особливості дослідження суднових електроенергетичних систем

Суднові електроенергетичні системи (СЕЕС) у порівнянні зі стаціонарними береговими системами електричного оснащення мають ряд особливостей, які відображаються на характері динамічних процесів цих установок у типових режимах роботи, [49, 69, 75, 76, 82, 83].

Відсутність демпферної обмотки суднового синхронного генератора викликає більш інтенсивні зміни напруги та частоти під час комутації суднових споживачів, вмиканні у паралельну роботу та під час аварій.

У коротких лініях електропередач суднової мережі відсутні значні активні та реактивні опори, які обмежують струми перехідних процесів у статорних колах генераторних установок.

Відносно невеликі сталі часу суднових електричних кіл створюють умови для збільшення швидкостей протікання електромагнітних перехідних процесів у генераторних установках.

Значно менші інерційності дизель-генераторів та турбогенераторів призводять до появи великих швидкостей механічних перехідних процесів у СЕЕС.

Мала величина статизму характеристик навантаження та швидкодія регуляторів привідних двигунів, а також необхідність паралельної роботи генераторів з різними типами привідних механізмів – все це має відчутний вплив на перехідні процеси суднової електростанції.

Широке використання спеціальних генераторів у складі суднової електростанції, таких як синхронні самозбуджувальні, синхронні безщіткові, асинхронні з фазним ротором або з конденсаторним самозбудженням, потребують дослідження їхнього впливу на динаміку СЕЕС.

Сумірність потужностей генераторів та навантаження, необхідність автономної роботи генераторів на електричні приводи великої потужності призводять до більш важких перехідних режимів, що ймовірно може знеструмити СЕЕС.

Впровадження силової напівпровідної перетворювальної техніки у великій кількості на судні робить виконання задачі з забезпечення якості суднової електроенергії більш складною.

Дослідженню процесів у автономних суднових електростанціях присвячено багато наукових робіт, оскільки для вдалого проектування та експлуатації СЕЕС необхідно виконувати розрахунки встановлених та перехідних процесів за різних робочих та аварійних режимів. Необхідним є визначення струмів, сил та моментів у елементах СЕЕС, зміни напруги та частоти мережі, тривалості перехідних режимів та стійкості роботи системи, вибір та оптимізація налаштувань систем регулювання та захисту суднових електростанцій.

Величини струмів, напруги та частоти у судновій мережі залежать від великої кількості факторів, таких як вид кривої намагнічування електричних машин, вихрові струми у масивних частинах магнітного кола, махові маси та пружні зв'язки в агрегатах, індуктивності статорних кіл та кіл збудження, характер нелінійності навантаження, налаштування регуляторів та багато іншого. Наявність у мережі великої кількості установок з нелінійними елементами ускладнює дослідження перехідних процесів аналітичними методами.

Тільки використання методів численного моделювання на ЕОМ станом на теперішній час дозволяє отримати якісні та кількісні характеристики нових суднових електростанцій у перехідних та сталих режимах.

1.4 Оцінка ефективності використання асинхронних генераторів на судах

Зниження експлуатаційних витрат це одна із основних проблем судноплавства. Вимога про те, щоб судна отримували міжнародний сертифікат енергоефективності, встановлює нові правила управління енергоефективністю судна та способи зниження споживання енергії на водному транспорті. Розробка енергоефективної стратегії роботи морського та річкового транспорту,

проектування та будівництво економічних та безпечних суден є пріоритетними, [98].

Підвищення енергоефективності полягає у значній економії первинних паливних ресурсів за рахунок зниження енергоспоживання.

Одним із способів підвищення ефективності експлуатації суден та зниження енергоспоживання є розробка оптимальних методів керування потоками електроенергії у багатогенераторних електростанціях суден, [91].

Небажані втрати виникають при виробництві, розподілі, перетворенні та використанні електроенергії в електричній системі судна. Суднові генератори мають активно-індуктивне навантаження, тобто загальний струм генераторів, трансформаторів і кабельних ліній повинен збільшуватися щодо необхідного активного навантаження на величину, обернено пропорційну значенню коефіцієнта потужності, що збільшує кількість необхідного електроустаткування. Генератори повинні забезпечувати додаткову реактивну потужність, що знижує енергоефективність через підвищену витрату палива первинних приводів, [68].

В даний час в автономних суднових електростанціях використовують генератори змінного трифазного струму, як генератор яких традиційно застосовують синхронні генератори (СГ). Їх виробництво налагоджено та їх конструкція оптимізована, [84 -86]. Наявність контактних кілець на роторі СГ, як їх основний експлуатаційний недолік, подолано за рахунок безконтактної технології його збудження шляхом встановлення на роторі зверненої синхронної машини і діодів, що обертаються, рис. 1.1, а. Ускладнення конструкції генератора збільшило його складність, масогабаритні показники та ціну. Також синхронні машини мають ще ряд особливостей та обмежень їх використання у багатогенераторних суднових установках.

Асинхронна машина має просту конструкцію короткозамкнутого ротора з алюмінієвою литою обмоткою типу «біляча клітка», рис. 1.1, б. Закрита конструкція обмотки ротора дозволяє зменшити величину повітряного зазору та знизити втрати шляхом потоку намагнічування, що дозволило зменшити геометричні розміри ротора і генератора.

Відсутність ковзних контактів і напівпровідникових елементів, що обертаються, заміна багатожильної мідної обмотки з ізоляцією на литу алюмінієву дозволяє підняти робочу температуру ротора і збільшити його максимальну частоту обертання, що розширює експлуатаційний діапазон застосування асинхронної машини в порівнянні з синхронною.

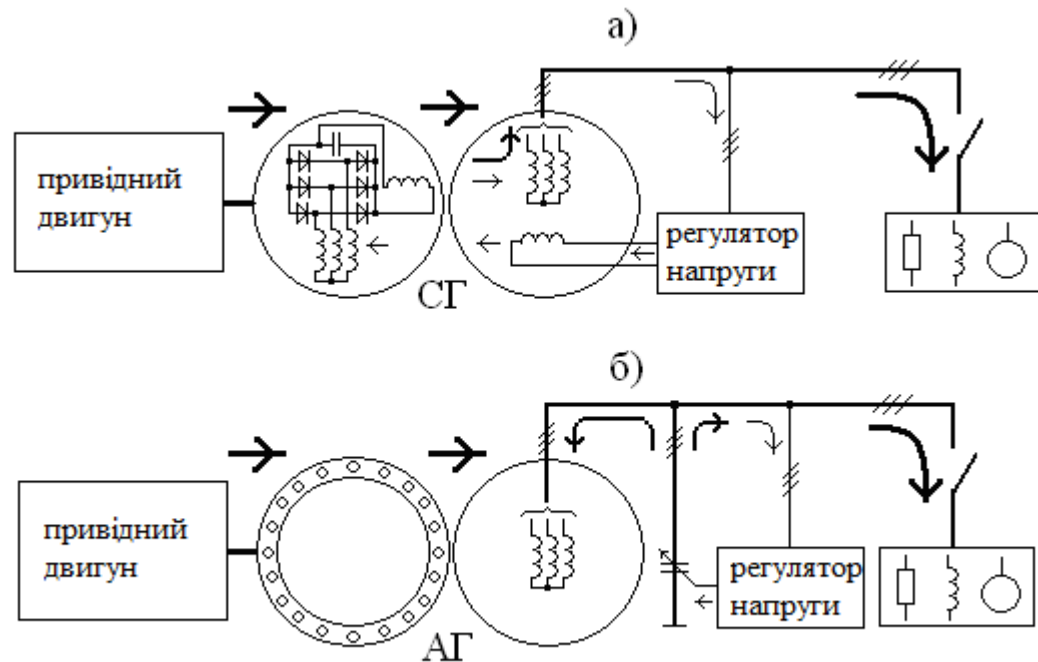


Рис.1.1 Суднові електроустановки з безконтактним синхронним (а) та асинхронним (б) генератором

При однакових характеристиках і асинхронна машина матиме більшу ступінь захищеності, найкращі масогабаритні та цінові показники. За даними конструкторів електричних машин, масо-габаритні показники асинхронних машин у 1.4 рази менші, ніж у синхронних з контактними кільцями на роторі, [38, 50]. Малий активний опір ротора та менший повітряний зазор визначають більш високий коефіцієнт корисної дії та економічність АГ порівняно з СГ [38, 87].

На рис. 1.2 наведені залежності ККД ряду промислових синхронних (SK, MGB, 1FC6) та асинхронних генераторів (G11R-G22R) різних виробників від їх номінальної активної потужності, а також асинхронних машин серії AIR, [84 - 87].

Коефіцієнт корисної дії АГ приблизно на 2% вище, ніж у СГ тієї ж потужності, що робить його використання більш економічним.

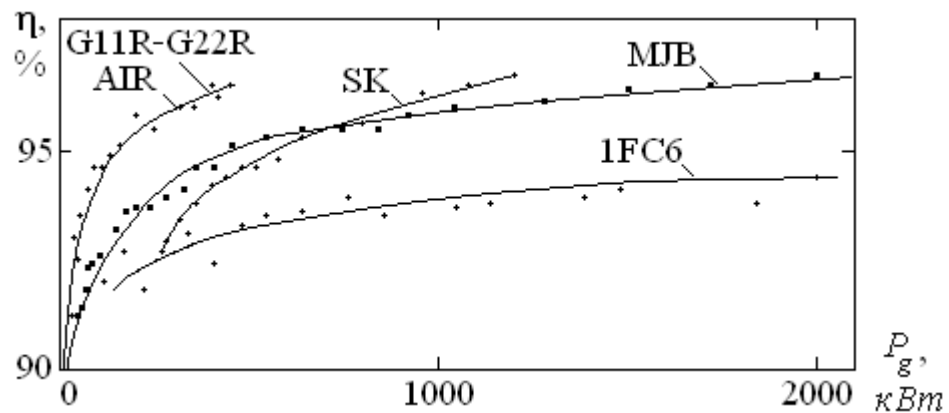


Рис.1.2 Коефіцієнт корисної дії синхронних та асинхронних генераторів

Причиною обмеженого застосування АГ у суднових енергоустановках є необхідність додаткового ємнісного джерела для збудження та керування напругою АГ.

За останні роки стався суттєвий прогрес у технології виробництва силових поліпропіленових конденсаторів змінного струму. Ціна і масо-габаритні показники конденсаторів знизилися, бо вони в основі мають дешеві та легкі компоненти: тонку полімерну плівку з алюмінієвим напиленням електродів. Питома вага таких конденсаторів дорівнює 0.1 кг/кВА., що майже у 100 разів менше ваги електричних машин, [84-87]. Вартість сучасних конденсаторів також на порядок менша від ціни генераторів.

Зниження ціни косинусних конденсаторів та силових напівпровідників в промисловості стимулювало виробництво та широке застосування установок компенсації реактивної потужності (УКРП) з комутацією блоків конденсаторів. УКРП установки відрізняються від систем збудження АГ лише контролерами керування.

СГ і АГ суттєво відрізняються системами регулювання напругою. Електромагнітне поле СГ створюється та змінюється обмоткою збудження за

рахунок струму в ній. Для зниження потужності управління обмотка збудження виконується багатовитковою для створення необхідного поля при невеликому струмі. При цьому індуктивність та стала часу обмотки збудження значно збільшуються, тому принципові можливості підвищення швидкодії СГ обмежені.

У динамічних режимах підвищення швидкодії системи регулювання напруги СГ використовують форсування збудження. Допускається короткочасне форсування напруги збудження на величину 5...8 кратну номінальному значенню.

В АГ збудження забезпечується за рахунок обміну енергією між індуктивністю машини та ємністю збудження, підключеної до статорних кіл. Напруга генератора залежить від намагнічування машини, величини ємнісного струму навантаження та частоти обертання [50, 53].

Регулятор АГ змінює ємнісний струм конденсаторів залежно від відхилення напруги від номінального значення. Струм навантаження генератора та ємнісний струм збудження протікають по статорному ланцюзі генератора, що дозволяє практично миттєво компенсувати реакцію генератора на навантаження. Проблема залишається лише у швидкому вимірі та виборі оптимального закону управління конденсаторним струмом. Таким чином, регулювання збудження АГ у ланцюзі статора дозволяє створити швидкодіючі та інваріантні системи стабілізації напруги [88, 89].

Якщо вимірювання напруги асинхронного генератора виконувати в першу половину періоду струму, що генерується, а комутацію конденсаторів - протягом другої половини періоду, то відновлення напруги АГ після комутації навантаження закінчується за 2...3 періоду, тобто. за 0.04 ... 0.06 с. Час перехідного процесу відновлення напруги СГ після комутації навантаження становить приблизно 0.5, рис.1.3, [90].

Принципова відмінність у системах збудження СГ та АГ визначає переважувальну здатність генераторів. При дворазовому і більше перевантаженні та обмеженій ємності збудження АГ різко знижує напругу до нуля, що не відбувається в СГ при перевантаженні, тому останній потребує захисту від перевантаження та коротких замикань.

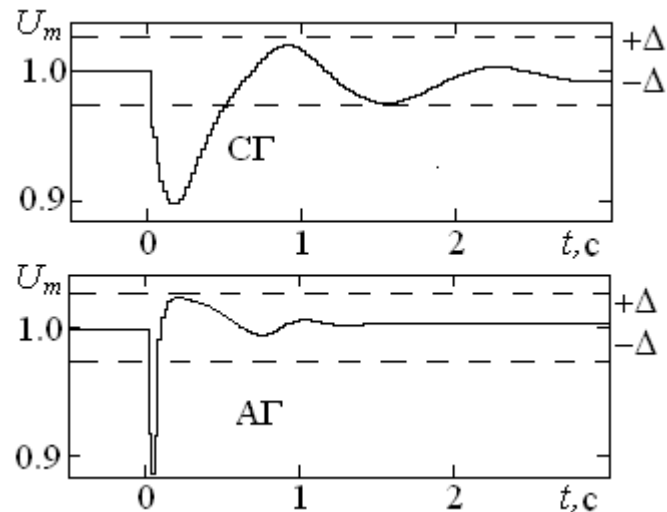


Рис.1.3 Перехідний процес відновлення напруги генераторів після включення 50% номінального навантаження з коефіцієнтом потужності 0.8, $\Delta=0.02$

Обмеження перевантажувальної здатності АГ пропорційно залежить від величини ємності збудження. Якщо генератор розраховується на номінальний $\cos \varphi = 0.8$, то можливий прямий пуск асинхронного двигуна потужністю до 30 % від потужності генератора.

При короткому замиканні АГ ємність збудження шунтується і генератор розвбуджується зі сталою часу контурів розсіювання обмоток генератора. Режим короткого замикання для АГ є безпечним. При цьому селективність захисту від коротких замикань у розгалуженій електричній мережі АГ повинна забезпечуватися за 2...3 періоди струму, [50].

Конденсатори збудження асинхронного генератора виконують роль фільтрів завад і спотворень, тому АГ має синусоїдальну форму кривої генерованої напруги з низьким вмістом гармонік [53], а також симетричність фазних напруг при нерівномірному розподілі навантаження, [50].

Електромагнітне поле СГ пов'язане з геометричною віссю ротора. Збільшення кута навантаження між полем та віссю обмотки більш ніж на 180

градусів призводить до аварійного режиму випадання із синхронізму. Небажаний також режим «качань ротора» СГ. При включення на паралельну роботу та при перерозподілі навантаження під час паралельної роботи випадання з синхронізму призводить до знеструмлення, [91].

Ковзання ротора АГ щодо поля статора виконує демпфуючу роль, що істотно підвищує стійкість системи паралельно працюючих генераторів. При цьому немає обмежень кількості генераторів, що працюють в одній мережі, що підтверджено досвідом використання АГ у вітроенергетиці.

Паралельна робота двох і більше СГ у судновій мережі викликає проблеми обмінних коливань потужності та вимагають високоякісних систем регулювання частоти обертання приводних двигунів з малими зонами нечутливості в елементах вимірювань та управління, [91].

Синхронізація та включення АГ у паралель менш небезпечний для суднової електростанції. При розбіжності фаз до 90 градусів провал напруги вписується у 30 %. У той самий час за різниці фаз понад 60 градусів провал напруги при включенні СГ перевищує 50 %.

На рис.1.4 наведені процеси включення на паралельну роботу синхронних та асинхронних генераторів: моментів синхронізації, частот обертання та встановлення напруг генераторів при різниці фаз до 90 градусів при включенні.

В обох випадках моменти синхронізації сягають 5 номінальних значень, а частоти відхиляються на 5...7 %. Згасання коливань моментів і частот при включенні на паралель СГ триває 0.7, а при аналогічному включенні АГ - 0.2 с. Динамічні відхилення модуля вектора напруги СГ становлять +50-80%, процес встановлення напруги триває 0.35 с. При включенні АГ напруга відхиляється на +20-30% протягом 0.2 с.

Якщо до працюючого АГ включати в паралель інший незбуджений АГ який обертається з синхронною частотою, то синхронізація відбудеться з двократним моментом, з відхиленням частот на 3% протягом 0.2 с, провал напруги складе 50% протягом 0.15 с.

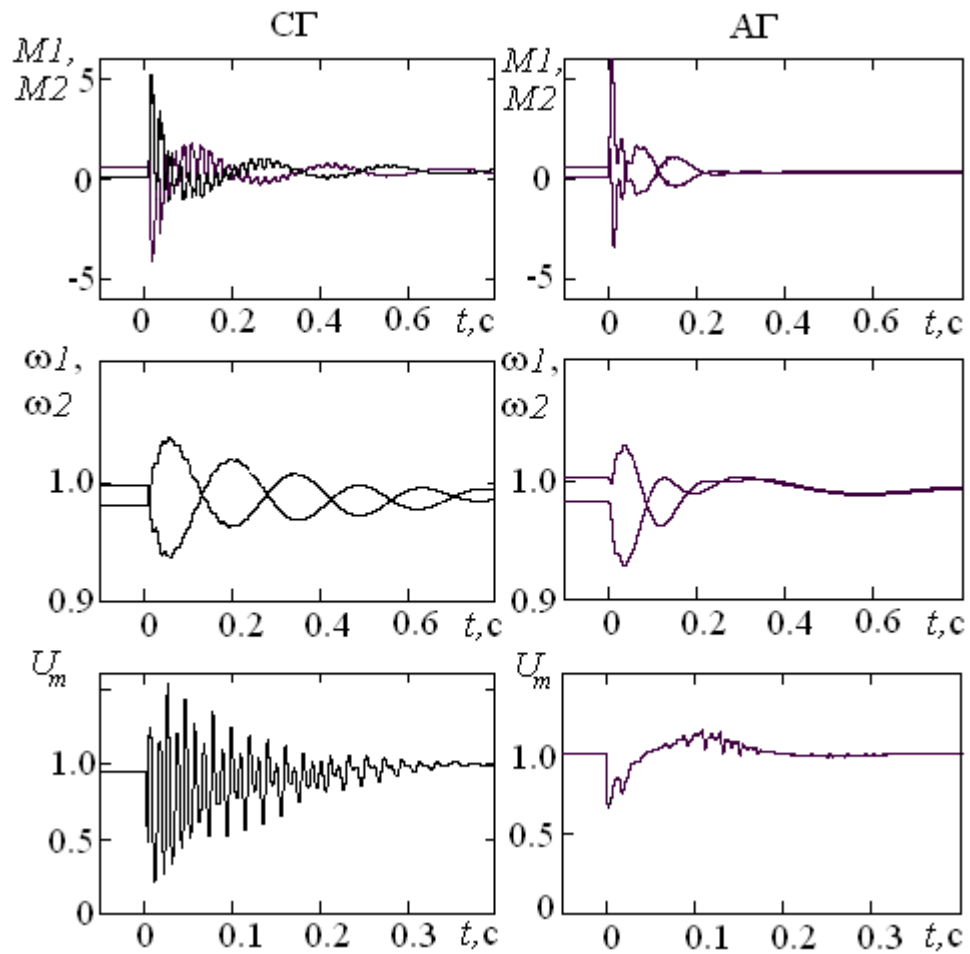


Рис.1.4 Процеси включення генераторів на паралельну роботу з різницею фаз 90 градусів

Розглянуті переваги АГ та прогрес виробництва конденсаторів та напівпровідникових ключів обґрунтовують ширше використання асинхронних генераторів як засіб підвищення енергетичної ефективності суднових електроустановок. На рис.1.5 представлений приклад застосування асинхронних генераторів у судновій електроенергетичній системі.

Істотною відмінністю запропонованої структури керування багатогенераторною електростанцією є спосіб регулювання напруги на шинах розподільчих щитів одним регулятором ємності збуджуючих конденсаторів БК. При цьому генераторні агрегати АГ підключаються до загальних шин своїми статорними обмотками і отримують необхідний струм збудження автоматично в залежності від активної потужності, що виробляється ними.

Таким способом вирішується проблема розподілу реактивної потужності між генераторами, яка для синхронних генераторів вирішується шляхом узгодження налаштовувальних параметрів регуляторів збудження кожного СГ.

Особливість запропонованої схеми полягає в тому, що стабілізація напруги АГ ємнісним струмом БК одночасно компенсує реактивну потужність кожного споживача змінного струму. У такій схемі джерелом компенсації реактивної потужності є загальний регулятор напруги, що управляє ємністю БК.

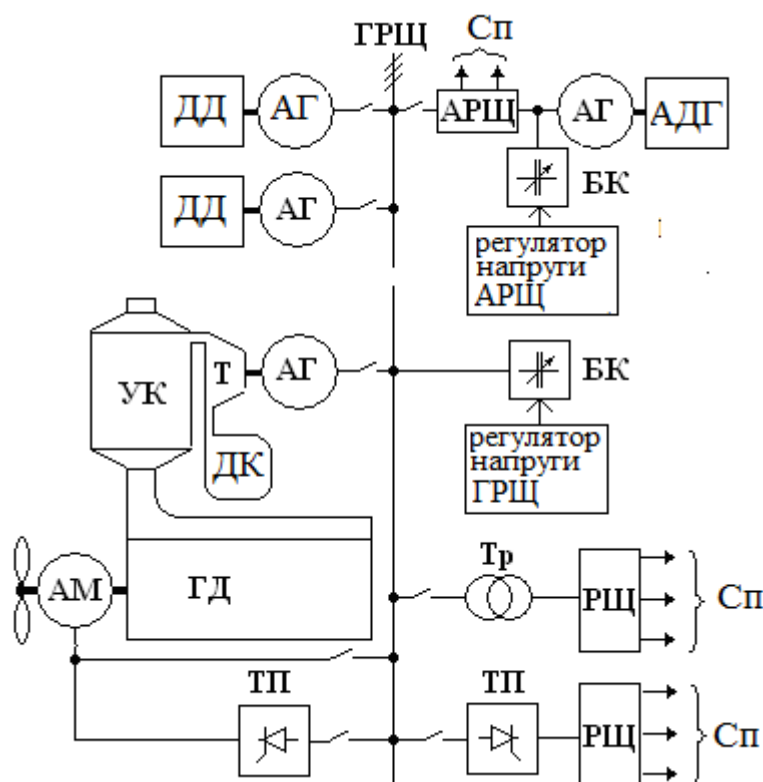


Рис.1.5 Суднова електроенергетична система з асинхронними генераторами із короткозамкненим ротором: ГРЩ, АРЩ, РЩ – головний, аварійний та місцевий розподільчий щит; ГД, ДД, АД – головний, допоміжний та аварійний двигун; УК, ДК – утилізаційний та допоміжний котел; Т – турбіна; Тр – трансформатор; ТП – тиристорний перетворювач; Сп – споживачі електроенергії; АДГ – аварійний дизель-генератор; БК – блок конденсаторів; АГ – асинхронний генератор; АМ – асинхронна машина.

Істотно найкращі масогабаритні показники сучасних конденсаторів дозволяють знизити встановлену потужність компенсуючих синхронних машин. Тобто якщо до складу традиційної суднової електростанції з СГ додати конденсаторну установку, то повний номінальний струм генераторів і генераторних автоматів можна буде знизити приблизно на 20%, [49].

На суднах підвищення енергоефективності головного двигуна застосовують утилізацію тепла відпрацьованих газів утилізаційним котлом і турбогенератором, і навіть відбір потужності валогенератором, див. рис.1.5.

На валу головного двигуна на сучасних суднах встановлюють оборотну електричну машину, яка виконає функції генератора або двигуна, залежно від режиму роботи головного двигуна. Найкращим рішенням є використання асинхронної короткозамкнутої машини АМ, див. рис.1. 5.

Висновки.

Асинхронний генератор має менші габарити і вагу, простіше конструкція короткозамкнутого ротора генератора, відсутні багатовиткові роторні обмотки, ковзаючі контакти і напівпровідникові елементи, що обертаються, відсутня струмова ізоляція на роторі, що підвищує граничну температуру нагрівання і забезпечує високі температури.

Вищий ККД АГ внаслідок малого значення активного опору ротора забезпечує його економічність.

Асинхронний генератор має синусоїдальну форму кривої генерованої напруги, симетричністю трифазної напруги при нерівномірному навантаженні.

Швидке згасання струмів розсіювання та втрата збудження забезпечує безпеку режимів коротких замикань для генератора.

Регулювання ємнісного збудження АГ кола статора дозволяє створити швидкодіючі та інваріантні системи стабілізації напруги.

Простота та безпека включення на паралельну роботу, відсутність коливань ротора при значних змінах навантаження забезпечують стійкість паралельної роботи у багатогенераторних електростанціях.

Переваги АГ підтверджують доцільність широкого впровадження асинхронних генераторних установок у електростанціях автономних об'єктів з метою підвищення надійності та зниження вартості електроенергії.

1.5 Технологічна карта дослідження

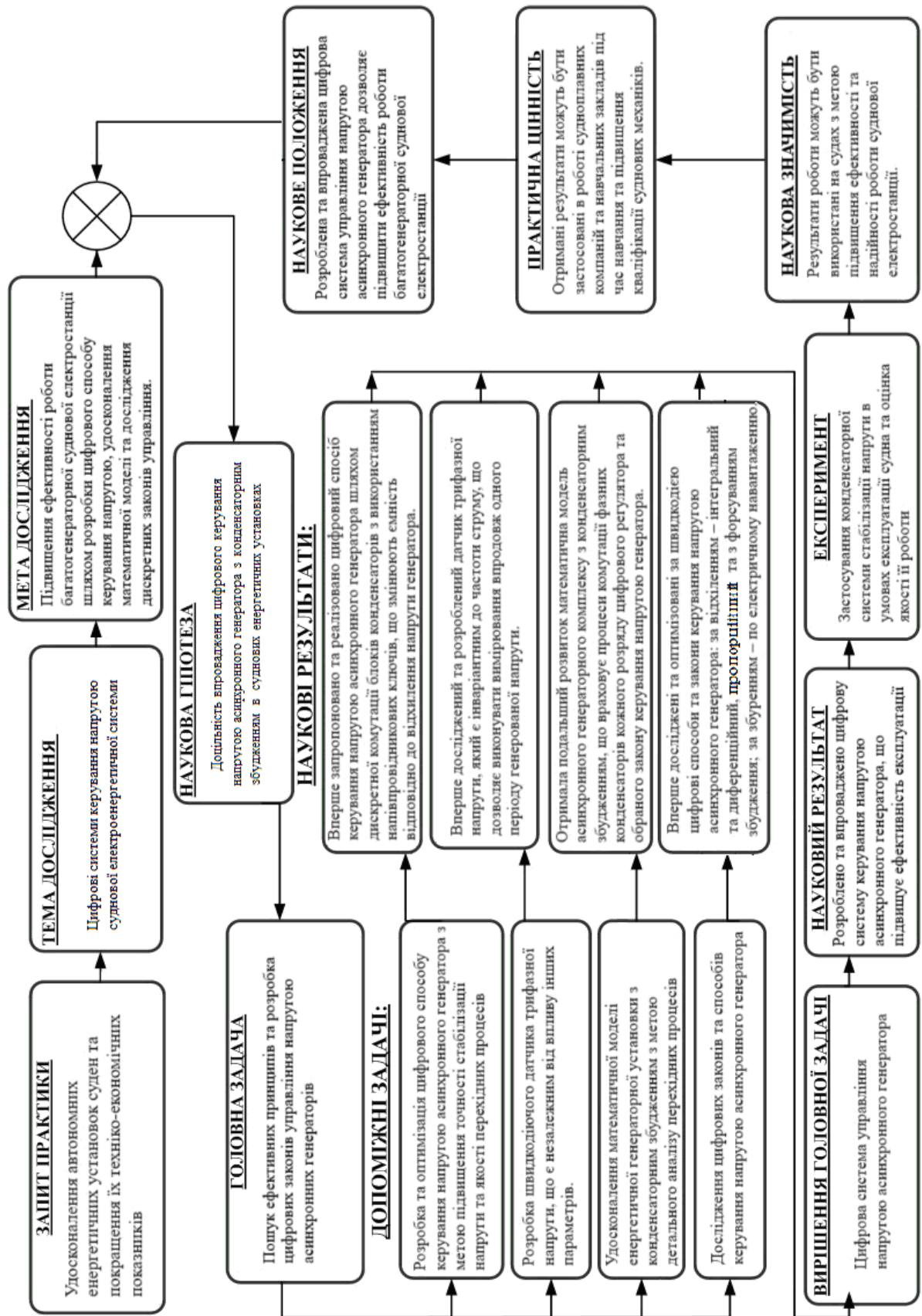


Рис. 1.6 Технологічна карта дослідження

2. МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ АСИНХРОННИМИ ГЕНЕРАТОРАМИ

Основою моделі та комп'ютерної програми є науково-дослідні роботи вчених НУ «ОМА», розпочатих у 1976 році під керівництвом професора А.Є. Пасса, [15, 30, 32, 49, 50, 53, 62, 68-71, 74, 77, 90, 93, 106].

2.1 Склад та структура математичної моделі електроенергетичної системи

Структура математичних моделей задається типовою або конкретною топологією СЕЕУ, рис. 2.1. Кожному енергетичному агрегату досліджуваного комплексу відповідає його математична модель, рис. 2. 2. Реальні зв'язки та енергетичні потоки моделюються шляхом агрегування відповідних моделей у вигляді підсистем.

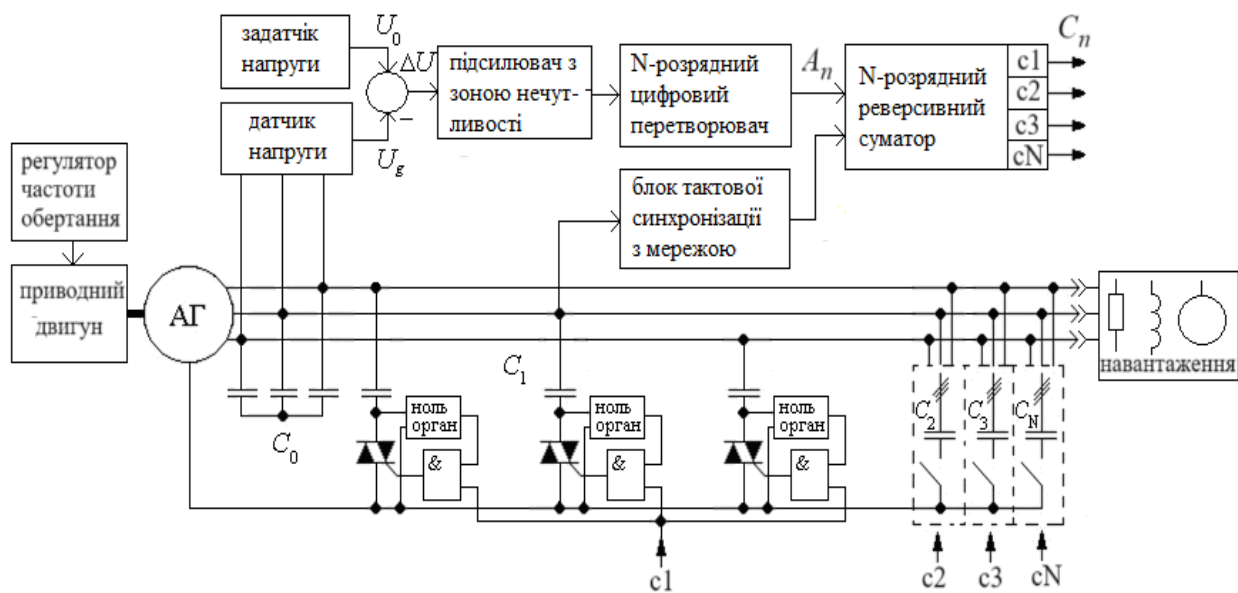


Рис.2.1 Схема асинхронної генераторної установки

Загальна математична модель СЕЕС складається із диференційних та алгебраїчних рівнянь, які описують процеси в окремих елементах електроенергетичної системи у зв'язках між ними з певним ступенем деталізації, а

також із сукупності допущень та спрощень, які приймаються під час математичного опису.

Ступінь деінтеграції енергетичного комплексу на окремі підсистеми під час математичного моделювання залежить від розробленості моделей, з яких складається комплекс. Деталізація процесів та рівень допущень визначається задачами моделювання та очікуваними результатами.



Рис.2.2 Структура моделі асинхронної електроенергетичної установки

Модель генераторної установки, яка в подальшому буде досліджуватися, складається з наступних рівнянь разом з сукупністю допущень:

- електричної машини змінного струму в генераторному режимі;
- приводу генератора з системою стабілізації частоти обертання;
- активного та реактивного навантаження генератора;
- конденсаторного регулятора збудження та напруги генератора;
- математичних та технологічних зв'язків між підсистемами моделі.

В наступних розділах приведені математичні моделі перелічених підсистем енергетичного комплексу, складені для вирішення задач даної роботи.

2.2 Моделювання генератора змінного струму

В автономних електроенергетичних системах суден використовуються багатогенераторні системи електричного оснащення та забезпечення руху, у яких можлива сумісна робота генераторів різних типів. Дослідження таких систем потребує використання моделей генераторів змінного струму з різними типами роторів.

У даному розділі представлена модель генератора, яка дозволяє шляхом вибору її параметрів задати тип генератора без зміни виду рівнянь, яка використовуються в моделі. Розглянемо модель узагальненого генератора змінного струму, яка була розроблена в роботі [77]. Необхідність у такій моделі обумовлена проблемами моделювання СЕЕС з різними типами генераторів. Структура програми за такого підходу буде мати у своєму складі єдиний блок рівнянь генератора змінного струму, що, в цілому, спростить та скоротить програму моделювання.

Модель генератора змінного струму створена на основі моделі ідеалізованої узагальненої електричної машини, яка описана рівняннями Парка-Горєва. Дані рівняння використовуються у більшості фундаментальних наукових робіт, які присвячені моделюванню процесів в електричних машинах [40, 41, 78].

За ідеалізацією електричної машини приймається система загальноприйнятих допущень [40-41]: геометричні параметри та обмотки симетричні відносно осей; машина має рівномірний та гладкий повітряний зазор та синусний розподіл обмоток; відсутні втрати у сталі та вихрові струми; насичення за шляхом основного магнітного потоку та за шляхом розсіювання взаємозалежні; відсутній гістерезис під час перемагнічування; у зазорі створюється кругове магнітне поле; індуктивності розсіювання та активні опори обмоток сталі та не залежать від частоти струму.

Напруга, струми та потокозчеплення позначаються зображувальними векторами $\bar{U}$, $\bar{I}$ та $\bar{\Psi}$, що дозволяє отримати компактний запис рівнянь Кірхгофа

(2.1) для кіл статора (індекси s), короткозамкненого ротора (індекси r) та роторного збудження (індекси f) узагальненого електричного генератора у системі координат, яка обертається відносно статора з довільною частотою ω_k :

$$\begin{aligned}\bar{U}_s + r_s \bar{I}_s + (p + j\omega_k) \bar{\Psi}_s &= 0, \\ r_r \bar{I}_r + (p + j\omega_k - j\omega_r) \bar{\Psi}_r &= 0, \\ \bar{U}_f + r_f \bar{I}_f + (p + j\omega_k - j\omega_r) \bar{\Psi}_f &= 0,\end{aligned}\tag{2.1}$$

де r_s, r_r, r_f – активні опори статора, короткозамкненої обмотки ротора та обмотки збудження.

Відомо декілька загальноприйнятих систем координат, які використовуються для запису рівнянь електричної машини [78]. Від вибору системи координат залежить вигляд рівнянь елементів та зв'язків між ними, а також значення коефіцієнтів. Раціональний вибір системи координат дозволяє з найменшими затратами обчислювальних засобів дослідити процеси у генераторній установці.

Під час вивчення огибаючих змінної напруги та струму в генераторі зручно використовувати ортогональну систему координат (u, v) , яка обертається відносно статора із синхронною швидкістю електричного поля. У встановленому режимі вектори напруги $\bar{U}_s$ та струму $\bar{I}_s$ статора у цій системі координат є нерухомими.

Наявність явнополюсної роторної обмотки збудження, вмикання до фазного ротора регулюючих елементів чи несиметрія ротора обумовлюють вибір системи координат (d, q) Парка-Горєва, жорстко зв'язаної з ротором, тобто яка обертається зі швидкістю ротора.

Ця система найкраще підходить для моделювання синхронного генератора, а також узагальненої електричної машини.

Систему координат, яка є нерухомою відносно статора, зручно використовувати під час дослідження миттєвих значень струмів та напруги у статорних колах генератора. При симетричному генераторі та навантаженні користуються ортогональною системою координат (α, β) . Якщо вісь α співпадає з електричною віссю деякої фази генератора, то проекції зображувальних векторів

на вісь α співпадають з фазними значеннями змінних у цій фазі. У випадку несиметричного навантаження та за наявності тиристорів у статорних колах прийнято використовувати нерухому трипроменеву систему координат (a, b, c) , осі якої співпадають з осями відповідних фаз.

Під час вирішення складніших задач доцільно використовувати декілька систем координат одночасно. Наприклад, під час моделювання синхронного генератора з несиметричним навантаженням або під час моделювання паралельної роботи генераторів, кожен з яких має свою частоту обертання ротора, зручно записувати рівняння генераторів у власних системах координат (d, q) , а рівняння навантаження – у системі (a, b, c) або (α, β) . У такій моделі повинні бути присутніми рівняння зв'язку між похідними, записаними у різних системах координат.

Розглянемо зв'язок між змінними для випадку несиметричного навантаження, рівняння якого записані у трипроменевій системі координат (a, b, c) , а рівняння електричної машини – у довільній ортогональній системі координат (x, y) , яка обертається з частотою ω_k . З опису процесів у кожній фазі, знаючи фазні напруги можна визначити фазні струми i_a, i_b, i_c . Відповідні фазні напруги пов'язані з проекціями зображувального вектору $\bar{U}_s$ на осі (x, y) системи координат, яка обертається з частотою ω_k :

$$\begin{aligned} u_a &= u_x \cos \omega_k t - u_y \sin \omega_k t; \\ u_b &= u_x \cos(\omega_k t - 2\pi/3) - u_y \sin(\omega_k t - 2\pi/3); \\ u_c &= u_x \cos(\omega_k t + 2\pi/3) - u_y \sin(\omega_k t + 2\pi/3). \end{aligned} \quad (2.2)$$

Визначивши за значеннями фазних напруг (2.2) фазні струми i_a, i_b, i_c , необхідним є перехід до проекцій вектора струму $\bar{I}_s$, який використовується у рівняннях генератора (2.3):

$$\begin{aligned} i_x &= \frac{2}{3} [i_a \cos \omega_k t + i_b \cos(\omega_k t - \frac{2\pi}{3}) + i_c \cos(\omega_k t + \frac{2\pi}{3})]; \\ i_y &= -\frac{2}{3} [i_a \sin \omega_k t + i_b \sin(\omega_k t - \frac{2\pi}{3}) + i_c \sin(\omega_k t + \frac{2\pi}{3})]. \end{aligned} \quad (2.3)$$

Універсальність математичної моделі автономного генератора змінного струму обумовлена тим, що спосіб генерування змінного струму у різних видах генераторів єдиний, та заснований на явищі електромагнітної індукції. Синхронний та асинхронний генератори відрізняються конструкцією їхніх роторів та систем збудження. Статорні обмотки всіх генераторів змінного струму принципово та конструктивно однакові. Тому для отримання універсальної моделі генератора можна описати найзагальніший тип генератора змінного струму, а генератор, що моделюється, розглядати як окремий випадок узагальненого.

У якості загального випадку було обрано синхронний явнополісний генератор з короткозамкненою обмоткою та явнополісною обмоткою збудження на роторі. Інші типи генераторів описуються наступним чином:

- неявнополісний синхронний генератор відрізняється рівністю електричних параметрів статора за осями d та q ;
- синхронний генератор без демпферної короткозамкненої обмотки на роторі описується її «розривом»;
- асинхронний генератор з короткозамкненим ротором (демперна обмотка) реалізується «розривом» обмотки збудження та наявністю ємнісного навантаження у ланцюзі статора;
- асинхронізований генератор з фазним ротором характеризується рівністю параметрів ротора за осями d та q , та розривом короткозамкненої обмотки.

Для опису узагальненого генератора використаємо систему координат (d, q) із-за наявності явнополісної обмотки збудження. Представимо систему рівнянь у формі Коші для зручності численного інтегрування відносно похідних потокозчеплень [79]:

$$\begin{aligned} \frac{d\psi_{sd}}{d\tau} &= \psi_{sq} \omega_r - r_s i_{sd} - u_{sd}; \quad \frac{d\psi_{sq}}{d\tau} = \psi_{sd} \omega_r - r_s i_{sq} - u_{sq}; \\ \frac{d\psi_{rd}}{d\tau} &= -r_r i_{rd}; \quad \frac{d\psi_{rq}}{d\tau} = -r_r i_{rq}; \quad \frac{d\psi_f}{d\tau} = u_f - r_f i_f, \end{aligned} \quad (2.4)$$

де ψ_{sd} , ψ_{sq} , ψ_{rd} , ψ_{rq} – проекції векторів потокозчеплень статора та ротора на осі d та q ;

u_{sd}, u_{sq} – проекції вектора напруги;

r_s, r_r – опори статорних та роторних обмоток;

$i_{sd}, i_{sq}, i_{rd}, i_{rq}$ – проекції вектора струму;

Ψ_f, i_f, u_f, r_f – потокозчеплення, струм, напруга та опір обмотки збудження;

τ – відносний час.

Потокозчеплення, які описані системою (2.4), пов'язані зі струмами:

$$\begin{aligned}\Psi_{sd} &= (L_d + L_{sd})i_{sd} + L_d i_{rd} + L_d i_f; \\ \Psi_{rd} &= (L_d + L_{rd})i_{rd} + L_d i_{sd} + L_d i_f; \\ \Psi_f &= L_d i_{sd} + L_d i_{rd} + L_f i_f; \\ \Psi_{sq} &= (L_q + L_{sq})i_{sq} + L_q i_{rq}; \\ \Psi_{rq} &= (L_q + L_{rq})i_{rq} + L_q i_{sq},\end{aligned}\tag{2.5}$$

де $L_{sd}, L_{sq}, L_{rd}, L_{rq}$ – індуктивності розсіювання статорних та роторних обмоток;

L_d, L_q – індуктивності головного контуру намагнічування за осями d та q ;

L_f – індуктивність обмотки збудження.

Численне розв'язання системи рівнянь (2.4) та (2.5) потребує вираження струмів генератора через потокозчеплення. Розв'язуючи систему (2.5) відносно струмів, введемо наступні позначення приведених індуктивностей та коефіцієнт симетрії:

$$l_{rd} = \frac{L_d}{L_d + L_{rd}}; l_{rq} = \frac{L_q}{L_q + L_{rq}}; l_{sd} = \frac{L_d + L_{sd}}{L_d}; l_{sq} = \frac{L_q + L_{sq}}{L_q}; l_f = \frac{L_d}{L_f}; k_c = \frac{L_q}{L_d}.\tag{2.6}$$

Шукані струми з урахуванням введених позначень (2.6) дорівнюють:

$$\begin{aligned}i_{sd} &= \frac{1}{\Delta_d} [\Psi_{sd}(1 - l_f l_{rd}) + \Psi_{rd} l_{rd} (l_f - 1) + \Psi_f l_f (l_{rd} - 1)]; \\ i_{rd} &= \frac{l_{rd}}{\Delta_d} [\Psi_{sd} (l_f - 1) + \Psi_{rd} (l_{sd} - l_f) + \Psi_f l_f (1 - l_{sd})]; \\ i_f &= \frac{l_f}{\Delta_d} [\Psi_{sd} (l_{rd} - 1) + \Psi_{rd} (1 - l_{sd}) + \Psi_f (l_{sd} - l_{rd})]; \\ \Delta_d &= L_d [l_{sd} (1 - l_{rd} l_f) + 2 l_{rd} l_f - l_{rd} - l_f]; \\ i_{sq} &= \frac{1}{\Delta_q} (\Psi_{sq} - \Psi_{rq} l_{rq}); i_{rq} = \frac{l_{rq}}{\Delta_q} (-\Psi_{sq} + \Psi_{rq} l_{sq}); \Delta_q = k_c L_d [l_{sq} - l_{rq}].\end{aligned}\tag{2.7}$$

Факт того, що коефіцієнти l_f та l_{rd} , l_{rq} дорівнюють нулю та опори r_f або r_r дорівнюють нескінченності відповідає фізичному розмиканню роторних обмоток генератора.

Таким чином, для задання типу генератора потрібно присвоїти певне значення введеним коефіцієнтам та опорам обмоток:

- синхронний явнополісний генератор з короткозамкненою демпферною обмоткою: $l_f \neq 0, l_{rd} \neq l_{rq}, r_r \neq \infty, r_f \neq \infty, k_c \neq 1$;

- синхронний неявнополісний генератор з короткозамкненою демпферною обмоткою: $l_f \neq 0, l_{rd} = l_{rq}, r_r \neq \infty, r_f \neq \infty, k_c = 1$;

- синхронний явнополісний генератор без короткозамкненої демпферною обмоткою: $l_f \neq 0, l_{rd} = l_{rq} = 0, r_r = \infty, r_f \neq \infty, k_c = 1$;

- асинхронний генератор з несиметричним фазним ротором: $l_f = 0, l_{rd} \neq l_{rq} \neq 0, r_r \neq \infty, r_f = \infty, k_c \neq 1$;

- асинхронний генератор з симетричним короткозамкненим ротором:

$l_f = 0, l_{rd} = l_{rq} \neq 0, r_r \neq \infty, r_f = \infty, k_c = 1$.

2.3 Моделювання асинхронного генератора

Детальне дослідження процесів у дизельних генераторах, валогенераторах та турбогенераторах, які мають у своєму складі асинхронний генератор з короткозамкненим ротором та статорним ємнісним збудженням зручно проводити на спеціальній моделі у тому випадку, коли задача порівняння типів генераторів не ставиться, [50, 53, 90, 91, 93].

Симетричність ротора та відсутність роторної обмотки збудження скорочують кількість рівнянь моделі у порівнянні з моделлю універсального генератора, яка була описана у попередньому розділі.

Для випадку симетричного навантаження генератора є доцільним записати рівняння машини у системі координат (α, β) у вигляді, зручному для численного

розв'язання, тобто відносно перших похідних потокозчеплень та відносно струмів у алгебраїчних рівняннях [78]:

$$\begin{aligned}\frac{d\psi_{s\alpha}}{d\tau} &= -u_{\alpha} - r_s i_{\alpha}; \quad \frac{d\psi_{s\beta}}{d\tau} = -u_{\beta} - r_s i_{\beta}; \\ \frac{d\psi_{r\alpha}}{d\tau} &= -\omega_r \psi_{r\beta} - r_r i_{r\alpha}; \quad \frac{d\psi_{r\beta}}{d\tau} = \omega_r \psi_{r\alpha} - r_r i_{r\beta};\end{aligned}\tag{2.8}$$

$$i_{\alpha} = [(L_m + L_{s\sigma})\psi_{s\alpha} - L_m \psi_{r\alpha}] / \Delta; \quad i_{\beta} = [(L_m + L_{s\sigma})\psi_{s\alpha} - L_m \psi_{r\alpha}] / \Delta;$$

$$i_{r\alpha} = [(L_m + L_{r\sigma})\psi_{r\alpha} - L_m \psi_{s\alpha}] / \Delta; \quad i_{r\beta} = [(L_m + L_{r\sigma})\psi_{r\beta} - L_m \psi_{s\beta}] / \Delta;$$

$$\Delta = (L_{s\sigma} + L_{r\sigma})L_m + L_{s\sigma}L_{r\sigma},$$

де $\psi_{s\alpha}$, $\psi_{s\beta}$, $\psi_{r\alpha}$, $\psi_{r\beta}$ – проекції вектора потокозчеплення статора та ротора та осі α та β ;

i_{α} , i_{β} , $i_{r\alpha}$, $i_{r\beta}$ – проекції вектора струму статора та ротора на осі α та β ;

u_{α} , u_{β} – проекції вектора напруги статора на осі α та β ;

$L_{s\sigma}$, $L_{r\sigma}$ – індуктивності контурів розсіювання статора та ротора;

L_m – індуктивність основного контуру намагнічування;

ω_r – частота обертання ротора.

Рівняння (2.8) застосовуються для симетричного навантаження генераторної установки, за іншої умови є необхідним використання перетворення ортогональних проекцій струмів та напруг на осі α та β у фазні змінні, подібно до описаних вище перетворень (2.2) та (2.3).

2.4 Моделювання кривої намагнічування

Одним із найважливіших питань під час математичного моделювання генераторних установок є врахування зміни їх параметрів через насиченість магнітного кола. При цьому змінюється провідність за шляхом основного потоку, що проявляється як зміна індуктивного опору обмоток статора та ротора [25, 37, 53, 93].

Під час моделювання комутації навантаження синхронного генератора у межах номінальних значень індуктивність основного контуру намагнічування може бути прийнята сталою, але явище насиченості необхідно враховувати під час моделювання процесів перевантаження, форсування та аварійних режимів, під час створення точних моделей суднових допоміжних установок.

Насичення сталі обов'язково повинне моделюватися у системі рівнянь асинхронного генератора [25, 46, 79], оскільки процес встановлення амплітуди електромагнітних коливань у ньому визначається саме характером нелінійності контуру намагнічування.

За численного інтегрування систем диференціальних рівнянь (2.5)-(2.7) індуктивності намагнічування L_d , L_q чи L_m обчислюються на кожному кроці розрахунку. Якщо система рівнянь записана відносно похідних потокозчеплень, то під час переходу на новий крок обчислень для розрахунку правих частин диференціальних рівнянь, алгебраїчних рівнянь для струмів і для індуктивностей L_d , L_q чи L_m використовуються значення потокозчеплень, отриманих на поточному кроці розрахунку. У роботах [26,46] для визначення індуктивності L_m за проекціями векторів потокозчеплень пропонується на кожному кроці інтегрування розв'язувати сумісно рівняння характеристики намагнічування L_m та прямої, яка визначається системою рівнянь типу (2.5).

Аналогічний підхід розроблено у роботі [25, 33]. Струм намагнічування пропонується виключити шляхом заздалегідь перебудованої характеристики намагнічування у залежність L_m від потокозчеплень, з наступною апроксимацією цієї залежності сплайнами. Отримана функція використовується на кожному кроці інтегрування за поточними значеннями потокозчеплень.

Процедура визначення індуктивностей L_d , L_q чи L_m значно спрощується, якщо для її знаходження використовувати не поточне, а попереднє значення змінних, це дозволяє знайти індуктивність за значенням струму намагнічування відразу з характеристики намагнічування. Крок інтегрування моделей є достатньо малим, тому похибка такого допущення порівнюється з точністю апроксимації кривої намагнічування. У розроблених алгоритмах розв'язання рівнянь суднової

допоміжної електроустановки використовується це допущення, що значно спрощує програми та скорочує машинний час, майже не впливаючи на точність розв'язання.

Вибір функції, яка апроксимує криву намагнічування, залежить від постановки задачі моделювання та від ступеня її наближення до експериментальної характеристики. Для цієї цілі використовується графічне та табличне представлення характеристики намагнічування, а також різні апроксимуючі функції: показові, гіперболічні, степеневі поліноми та інші.

У розроблених моделях та програмах використані апроксимації кривої намагнічування функціями Ланжевена, запропонованими у роботах [50, 53].

Функція Ланжевена є аналітичним виразом, отриманим на основі аналізу фізичних процесів намагнічування феромагнітного матеріалу генератора, як спільного прояву двох процесів: спонтанного намагнічування під дією взаємодії магнітних моментів всередині доменів та орієнтації сумарних моментів доменів відносно зовнішнього магнітного поля.

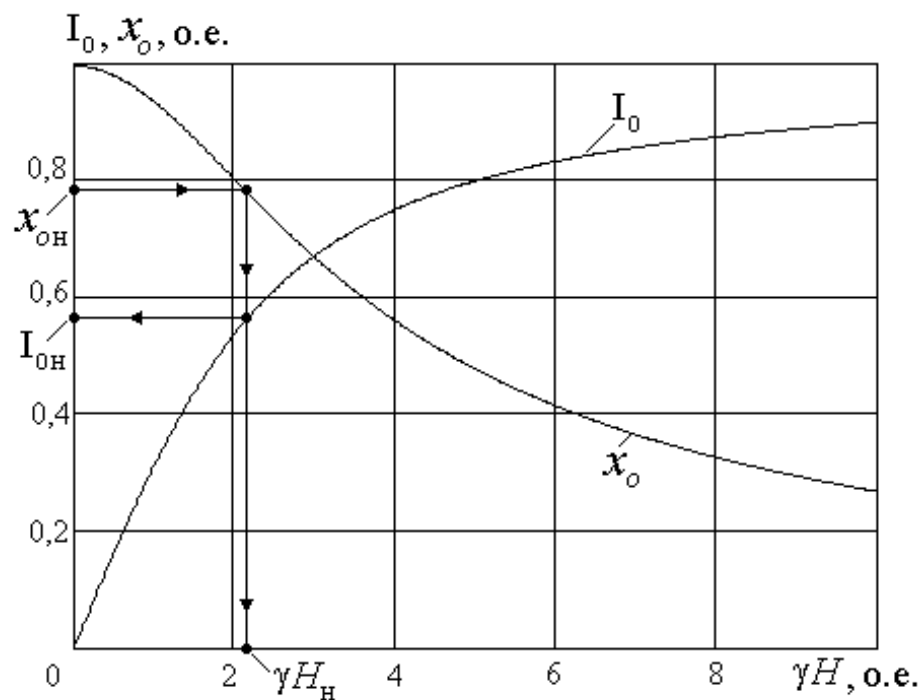


Рис.2.3 Апроксимація кривої намагнічування функцією Ланжевена

У роботі [81] показано, що відносно намагнічування феромагнітного матеріалу I_0 пов'язане з напруженістю магнітного поля H функцією Ланжевена, показаною на рис. 2.3: $I_0 = \text{cth}(\gamma H) - \frac{1}{\gamma H}$.

У електричних колах змінного струму напруженість магнітного поля H пропорційна струму намагнічування I_μ , а ЕРС E та потокозчеплення Ψ - пропорційні величині магнітної індукції B , яка для феромагнітних матеріалів пропорційна намагнічуванню I_0 . Таким чином, характеристика намагнічування може бути апроксимована нормованою функцією Ланжевена:

$$m_e E = m_\psi \Psi = \text{cth}(m_i I_\mu) - \frac{1}{m_i I_\mu}, \quad (2.9)$$

де m_e , m_ψ , m_i - масштабні коефіцієнти, які залежать від властивостей феромагнітного матеріалу, температури, конструкції магнітопроводу, кількості витків обмоток та від частоти змінного струму. Вони можуть бути визначеними з експериментальних кривих намагнічування конкретних генераторів за допомогою методу найменших квадратів. Можна скористатися нормованим виразом відносно реактивного опору, рис. 2.3.:

$$x_0 = \frac{3I_0}{\gamma H} = \frac{3 \text{cth}(\gamma H)}{\gamma H} - \frac{1}{(\gamma H)^2},$$

де $x_0 = x_n / x_\lambda$, де x_n , x_λ - реактивні опори у номінальній точці та на лінійному проміжку кривої намагнічування, E_n , Ψ_n та $I_{\mu n}$. Для цієї точки $x_0 = x_n / x_\lambda$ визначається, а потім за кривою Ланжевена знаходяться відповідні значення I_{0n} та λH_n , за якими визначаються значення масштабних коефіцієнтів: $m_e = I_0 / E$, $m_\psi = I_0 / \Psi$, $m_i = \gamma H / I_\mu$.

Функція Ланжевена дозволяє апроксимувати криву намагнічування за всім діапазоном зміни струму намагнічування, що є особливо важливим під час моделювання процесів самозбудження, форсування збудження, перенапруги та перевантаження суднової електроустановки, рис. 2.4

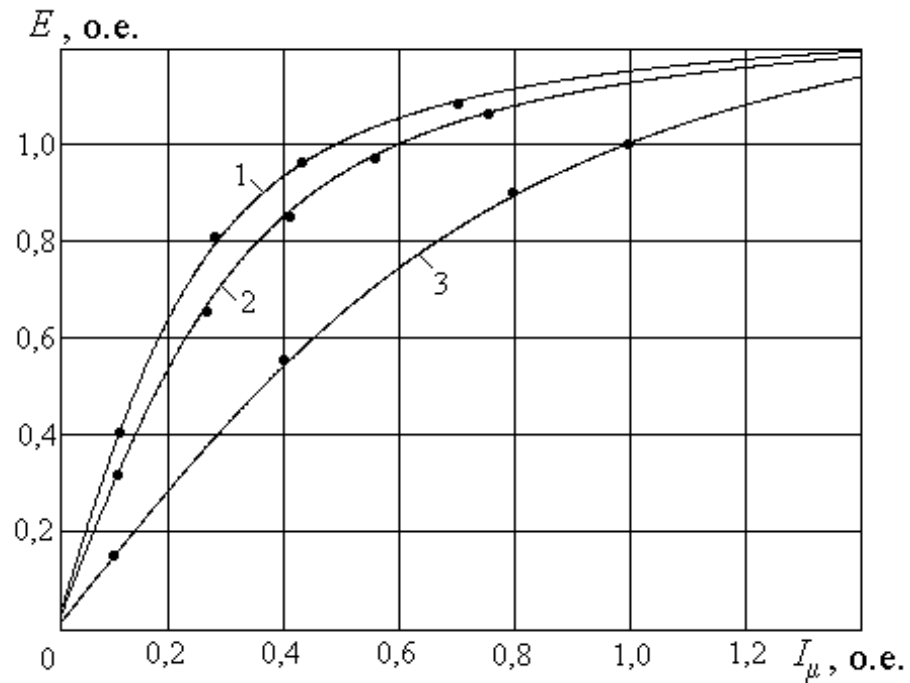


Рис.2.4 Апроксимація вольт-амперних характеристик електричних машин функцією Ланжевена: 1 – синхронний двигун; 2 – синхронний генератор; 3 – машина постійного струму

Похибка апроксимації характеристик асинхронного та синхронного генератора відносно експериментальних даних не перевищила 2% .

2.5 Моделювання навантаження електроустановки

Споживачами електроенергії суднової електростанції є статичне, двигунне та тиристорно-випрямне навантаження. Простішим випадком для моделювання можна розглянути симетричне змішане статичне навантаження [53, 93]. При активно-індуктивно-ємнісному характері споживачів генератора векторне операторне рівняння зв'язку статорного струми та напруги, записане у системі координат, яка обертається з частотою ω_k , має вигляд:

$$\bar{I}_s = \left[g + \frac{1}{(p + j\omega_k)L} + (p + j\omega_k)C \right] \bar{U}_s \quad (2.10)$$

де g , L , C – активна провідність, індуктивність та ємність навантаження.

Рівняння (2.12) у системі координат (α, β) за $\omega_k=0$ може бути представлене у вигляді системи диференціальних рівнянь Коші:

$$\frac{du_\alpha}{d\tau} = \frac{1}{C}(i_\alpha - i_{L\alpha} - gu_\alpha); \frac{du_\beta}{d\tau} = \frac{1}{C}(i_\beta - i_{L\beta} - gu_\beta); \frac{di_{L\alpha}}{d\tau} = \frac{u_\alpha}{L}; \frac{di_{L\beta}}{d\tau} = \frac{u_\beta}{L}. \quad (2.11)$$

Як правило рівняння генератора та навантаження записують в різних системах координат, тоді для їх зв'язку потрібно використовувати перетворення координат

$$\begin{aligned} i_\alpha &= i_x \cos \gamma - i_y \sin \gamma; & u_x &= u_\alpha \cos \gamma + u_\beta \sin \gamma; \\ i_\beta &= i_x \sin \gamma + i_y \cos \gamma; & u_y &= -u_\alpha \sin \gamma + u_\beta \cos \gamma, \end{aligned} \quad (2.12)$$

де $\gamma = \omega_k \tau + \theta$, ω_k - частота обертання систем координат (x, y) та (α, β) , θ – початковий кут між осями x та α .

У судновій енергетичній установці найважливішим експлуатаційним режимом є паралельна робота допоміжних електроустановок, при цьому зв'язок між генераторами здійснюється за допомогою навантаження. Причому кожний з генераторів моделюється у власній системі координат. В загальному випадку під час паралельної роботи n суднових генераторних установок у рівняннях (2.11, 2.12) струм спільного навантаження дорівнює сумі статорних струмів генераторів:

$$i_\alpha = \sum_{i=1}^n i_{\alpha i}, [53].$$

Режим несиметричного за фазами навантаження суднового генератора виникає під час використання випрямлячів або тиристорних перетворювачів, а також під час аварійних ситуацій, наприклад, при обриві фази. Під час моделювання таких режимів повинен бути встановлений зв'язок між фазними струмами та напругами, що збільшує кількість диференціальних рівнянь.

В такому разі рівняння змішаного навантаження потрібно записати у наступному вигляді:

$$\begin{aligned}
\frac{di_{La}}{d\tau} &= u_a / L_a; & \frac{du_a}{d\tau} &= (i_a - i_{La} - g_a u_a) / C_a; \\
\frac{di_{Lb}}{d\tau} &= u_b / L_b; & \frac{du_b}{d\tau} &= (i_b - i_{Lb} - g_b u_b) / C_b; \\
\frac{di_{Lc}}{d\tau} &= u_c / L_c. & \frac{du_c}{d\tau} &= (i_c - i_{Lc} - g_c u_c) / C_c;
\end{aligned}
\tag{2.13}$$

2.6 Моделювання систем збудження асинхронних генераторів

Існують дві принципово різні системи збудження суднових генераторів: за колом статора (навантаження) або через обмотку збудження. Перша система використовується у асинхронних генераторах з короткозамкненим ротором та у системах конденсаторної компенсації реактивного навантаження суднових споживачів, а інша – у синхронних та асинхронізованих генераторах, які мають спеціальні обмотки збудження.

З метою більш точного моделювання процесів регулювання напруги асинхронного генератора, що самозбуджується, в дисертації модель доповнена описом напівпровідникової комутації трифазних блоків конденсаторів. У ній враховуються перехідні процеси у всіх фазних конденсаторах, комутація яких відбувається тільки в моменти нульового струму через них.

Розрахункова схема доповнень моделі конденсаторного збудження генератора наведена на рис. 2.5.

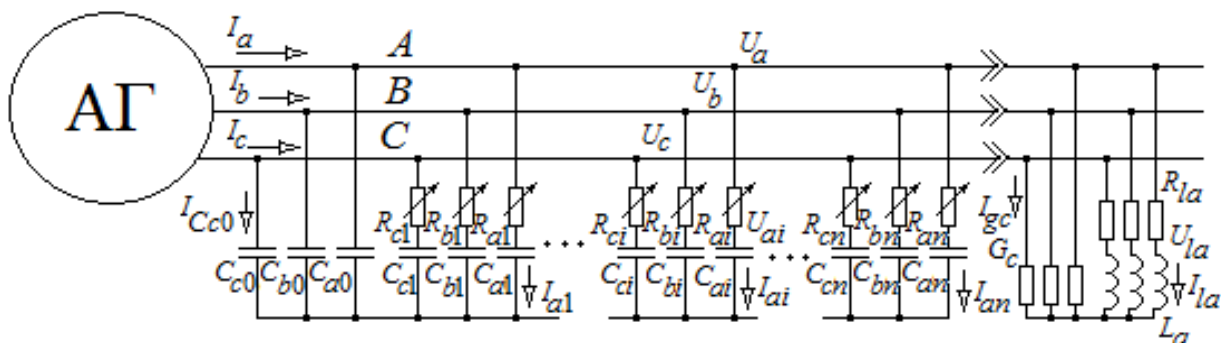


Рис. 2.5 Схема моделі конденсаторного збудження асинхронного генератора

Система конденсаторного статорного збудження моделюється шляхом зміни ємності конденсаторів у рівняннях (2.13) у синхронізовані моменти часу. Збудження здійснюється шляхом зміни кількості увімкнених конденсаторів, тому у рівняннях моделі ємність розглядається як керуючий параметр.

Якщо процесом неодночасності вмикання конденсаторів знехтувати, то рівняння (2.8) та (2.13) спрощуються і, відповідно, зменшується кількість рівнянь та операторів у програмі. Порівняння результатів моделювання за обома варіантами програм та з експериментальними даними показує, що одночасна комутація конденсаторів під час розрахунку систем регулювання напруги не дозволяє детально аналізувати перехідні процеси відхилення напруги генератора.

Тому в дисертації зроблена модернізація та доповнення моделі конденсаторного збудження асинхронного генератора. Комутуючі напівпровідникові ключі в моделі описуються як змінні резистори, опір яких має два значення: у відкритому та закритому стані.

Процесом перемикання напівпровідникових ключів з одного стійкого стану до іншого знехтуємо через його короткочасність. Різницю в опорах ключів у відкритому та закритому стані встановимо значною: $R_{on} = 0.1$ та $R_{off} = 1000$ відносних одиниць.

У технічно досконалих регуляторах комутація конденсаторів здійснюється без їхньої перезарядки, тому зміні ємності конденсаторів відповідає зміна опору тиристорного ключа у моменти узгодженої комутації. Ці моменти у фазах не співпадають, тому процес перемикання усіх конденсаторів займає частину періоду струму і в цей час фазні ємності не однакові, тобто навантаження генератора несиметричне.

Для кожного конденсатора стан ключів змінюються в моменти переходу струмів комутуваних конденсаторів через нульове значення, що забезпечує їхнє підключення без перезаряду:

if $I_{C_n} > 0$ then begin if $I_{C_{n-1}} * I_{C_n} < 0$ then $R_K = R_{on}$ end; $I_{C_{n-1}} := I_{C_n}$;

При відключенні опір ключа збільшується:

$$\text{if } I_{C_n} < 0 \text{ then } R_K = R_{off} .$$

Врахування неодночасності переключень конденсаторів за схемою рис. 2.5 потрібно скористатися рівняннями генератора (2.8) та модернізувати рівняння навантаження (2.13).

$$\begin{aligned} \frac{dI_{la}}{d\tau} &= \frac{U_a - I_{la}R_{la}}{L_a}, \frac{dI_{lb}}{d\tau} = \frac{U_b - I_{lb}R_{lb}}{L_b}, \frac{dI_{lc}}{d\tau} = \frac{U_c - I_{lc}R_{lc}}{L_c}, \\ &\dots \\ I_{ai} &= \frac{U_a - U_{ai}}{R_{ai}}; I_{bi} = \frac{U_b - U_{bi}}{R_{bi}}; I_{ci} = \frac{U_c - U_{ci}}{R_{ci}}; \\ \frac{dU_{ai}}{d\tau} &= \frac{I_{ai}}{C_{ai}}; \frac{dU_{bi}}{d\tau} = \frac{I_{bi}}{C_{bi}}; \frac{dU_{ci}}{d\tau} = \frac{I_{ci}}{C_{ci}}; \\ &\dots \\ I_{Ca0} &= I_a - U_a G_a - I_{la} - I_{a1} - \dots - I_{ai} - \dots - I_{an}; \\ I_{Cb0} &= I_b - U_b G_b - I_{lb} - I_{b1} - \dots - I_{bi} - \dots - I_{bn}; \\ I_{Cc0} &= I_c - U_c G_c - I_{lc} - I_{c1} - \dots - I_{ci} - \dots - I_{cn}; \\ \frac{dU_a}{d\tau} &= \frac{I_{Ca0}}{C_{a0}}; \frac{dU_b}{d\tau} = \frac{I_{Cb0}}{C_{b0}}; \frac{dU_c}{d\tau} = \frac{I_{Cc0}}{C_{c0}}. \end{aligned} \quad (2.14)$$

Зміна станів ключів управляється залежно від відхилення напруги від заданого значення за заданим законом, який реалізує цифровий регулятор, описаний у наступних розділах роботи.

Регулятор збудження реалізує закон зміни ємності у дискретні моменти часу. Між комутаціями ємність залишається сталою. В загальному випадку лінійного дискретного регулятора його рівняння буде мати вигляд:

$$\begin{aligned} C^*(t) &= k_1 U^*(t) + k_2 U^*(t - T_0) + k_3 C^*(t - T_0) \\ U^*(t) &= U_g^*(t) - U_0 \end{aligned} \quad (2.15)$$

де k_1, k_2, k_3 – коефіцієнти налаштування регулятора напруги.

Напруга генератора поступає у систему регулювання від датчика напруги U_{dat} , сигнал якого пропорційний середньому навантаженню на кожному кроці Δt розв'язання рівнянь системи збудження за період комутації T_0 :

$$U_g = U_{dat} = \frac{\Delta t}{T_0} \sum_{i=1}^{T_0/\Delta t} \sqrt{U_{\alpha i}^2 + U_{\beta i}^2} \quad (2.16)$$

Аналоговий пропорційно-інтегральний закон управління напругою АГ має вигляд:

$$C(t) = k_p \cdot Y(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t U(t) dt. \quad (2.17)$$

Де $C(t)$ - керуючий вплив - ємність конденсаторів.

$U(t) = U_{dat}(t) - U_0$ - регульована напруга генератора.

k_p, T_i - коефіцієнт пропорційності та постійна інтегрування регулятора.

Вимірювання та усереднення регульованої напруги U_{dat} виконуємо протягом періоду комутації конденсаторів, кратного або рівного періоду мережі. Безпечна комутація T_0 трифазних секцій конденсаторів виконується в наступний за виміром період.

Розглянемо систему керування напругою генератора як дискретно-імпульсну з періодом дискретності, кратним періоду електричної мережі T_0 . Дискретно-імпульсний закон отримаємо заміною часу t у рівнянні (2.17) з його квантованим значенням $t = nT_0$, де n - поточний крок комутації.

$$C(nT_0) = k_p \cdot U(nT_0) + \frac{1}{T_i} \int_0^t U(nT_0) dt.$$

Введемо позначення дискретних змінних

$$C_n^*(t) = C(nT_0); \quad U_n^*(t) = U(nT_0).$$

Тоді дискретно-імпульсний закон управління має вигляд:

$$C_n^*(t) = k_p \cdot U_n^*(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t U_n^*(t) dt. \quad (2.18)$$

Замінімо в рівнянні (2.18) інтегральну функцію на інтегральну складову ємності на n -ному кроці комутації

$$C_{in}^*(t) = \frac{1}{T_i} \int_0^t U_n^*(t) dt. \quad (2.19)$$

На попередньому етапі комутації інтегральна складова ємності (2.19) дорівнює:

$$C_{i(n-1)}^*(t) = \frac{1}{T_i} \int_0^{t-T_0} U_{n-1}^*(t) dt \quad (2.20)$$

Замінімо інтеграл (2.20) наближеною рівністю частини інтеграла на останньому кроці площею трапеції:

$$\begin{aligned} C_{in}^*(t) &= \frac{1}{T_i} \int_0^t U_n^*(t) dt \approx \frac{1}{T_i} \int_0^{t-T_0} U_{n-1}^*(t) dt + \frac{T_0}{T_i} \cdot \frac{U_{n-1}^*(t) + U_n^*(t)}{2} = \\ &= C_{i(n-1)}^*(t) + \frac{T_0}{T_i} \cdot \frac{U_{n-1}^*(t) + U_n^*(t)}{2}. \end{aligned} \quad (2.21)$$

У формулі (2.21) інтеграл на n кроці замінений на його значення на $n-1$ кроці $C_{i(n-1)}^*(t)$ плюс площа трапеції, утвореної сусідніми значеннями напруги, що регулюється величини $U_n^*(t)$.

Знайдемо повне значення дискретно-імпульсного сигналу $C_n^*(t)$, замінивши у виразі (2.21) частину інтеграла на його попереднє значення $C_{n-1}^*(t)$.

Знайдемо повне значення дискретно-імпульсного сигналу, замінивши у виразі (2.21) частину інтеграла з його попереднє значення.

$$\begin{aligned} C_n^*(t) &= k_p U_n^*(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t U_n^*(t) dt = k_p U_n^*(t) + C_{in}^*(t) \approx \\ &\approx k_p U_n^* + C_{i(n-1)}^*(t) + \frac{T_0}{T_i} \cdot \frac{U_{n-1}^*(t) + U_n^*(t)}{2}. \end{aligned} \quad (2.22)$$

Для попереднього кроку $n-1$ вираз (2.22) має вигляд:

$C_{n-1}^*(t) = k_p U_{n-1}^*(t) + C_{i(n-1)}^*(t)$, откуда получим

$$C_{i(n-1)}^*(t) = -k_p U_{n-1}^*(t) + C_{n-1}^*(t). \quad (2.23)$$

Далі підставимо значення $C_{i(n-1)}^*(t)$ з (2.23) у вираз (2.22):

$$\begin{aligned} C_n^*(t) &= k_p U_n^* + C_{n-1}^*(t) - k_p U_{n-1}^*(t) + \frac{T_0}{T_i} \cdot \frac{U_{n-1}^*(t) + U_n^*(t)}{2} = \\ &= C_{n-1}^*(t) + (k_p + \frac{T_0}{2T_i})U_n^*(t) + (\frac{T_0}{2T_i} - k_p)U_{n-1}^*(t). \end{aligned} \quad (2.24)$$

Для реалізації закону управління (2.24) необхідно скласти три змінні, які отримуються на поточному та попередньому етапі комутації.

Якщо як наближення при обчисленні інтеграла в рівнянні (2.19) використовувати площу прямокутника, то реалізація дискретно-імпульсного ПІ-закону управління буде наступною.

$$\begin{aligned} C_{in}^*(t) &= \frac{1}{T_i} \int_0^t U_n^*(t) dt \approx \frac{1}{T_i} \int_0^{t-T_0} U_{n-1}^*(t) dt + \frac{T_0}{T_i} \cdot U_n^* = C_{i(n-1)}^*(t) + \frac{T_0}{T_i} \cdot U_n^*. \\ C_n^*(t) &= C_{n-1}^*(t) + (k_p + \frac{T_0}{T_i})U_n^*(t) - k_p U_{n-1}^*(t). \end{aligned} \quad (2.25)$$

Вважаючи $k_p = 0$, отримаємо вираз для інтегрального дискретно-імпульсного закону управління:

$$C_n^*(t) = C_{n-1}^*(t) + \frac{T_0}{T_i} U_n^*(t). \quad (2.26)$$

Аналогом пропорційного закону для дискретно-імпульсного управління вважатимемо вираз пропорційної залежності ємності $C_n^*(t)$, що комутується, від відхилення напруги генератора $U_n^*(t) = U_{dat}^*(t) - U_0$:

$$C_n^*(t) = k_p \cdot U_n^*(t). \quad (2.27)$$

Властивості систем управління з різними законами управління досліджені на розробленій моделі асинхронного суднового дизельгенератора.

2.7 Моделювання приводного двигуна генераторної установки

Привід електричної установки у суднових системах електропостачання має співвимірну з генератором потужність, тому частота його обертання не залишається сталою під час зміни навантаження генератора. Цей факт повинен враховуватися під час моделювання, [53, 75, 90, 91, 93].

Рівняння привода описується диференціальним рівнянням першого порядку:

$$J \frac{d\omega_r}{d\tau} = M_d - M_c; M_c = \operatorname{Re}(\bar{\Psi}_s) \cdot \operatorname{Im}(\bar{I}_s) - \operatorname{Im}(\bar{\Psi}_s) \cdot \operatorname{Re}(\bar{I}_s), \quad (2.28)$$

де M_c – електромагнітний момент опору, який розвивається генератором;

M_d – механічний момент приводного двигуна;

J – момент інерції валу двигуна та ротора генератора.

Система регулювання частоти обертання містить датчик частоти обертання у вигляді тахогенератора, оптичного або магнітно-електричного перетворювача кількості імпульсів за один оберт валу в аналогову напругу. У традиційних гідравлічних регуляторах частоти обертання використовують відцентровий чутливий елемент частоти обертання.

Регулятор частоти обертання перетворює неузгодженість ε між заданою ω_{r0} і фактичною частотою ω_r положення паливної рейки h , що забезпечує відповідний рушійний момент дизеля M_d , рис. 2.6.

Нелінійна ланка типу «люфт» розташована між чутливим елементом частоти обертання та регулюючим лінійним блоком, рис. 2.7.

Якщо якийсь час різниця між ε і $\Delta\omega$ перевищить люфт Δ_n , то вихідна величина $\Delta\omega$ почне змінюватися, повторюючи вхідну змінну ε з різницею на Δ_n , тобто $\Delta\omega(n) = \varepsilon(n) + \Delta_n$ або $\Delta\omega(n) = \varepsilon(n) - \Delta_n$ в залежності від знаку ε .

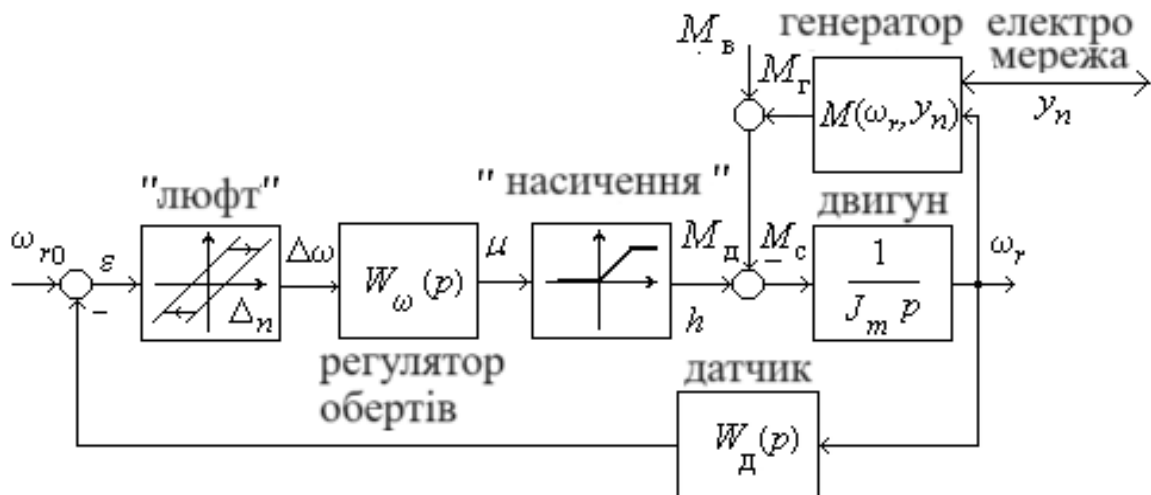


Рис.2. 6 Структурна схема модельованої системи регулювання частоти обертання приводного двигуна електрогенераторної установки

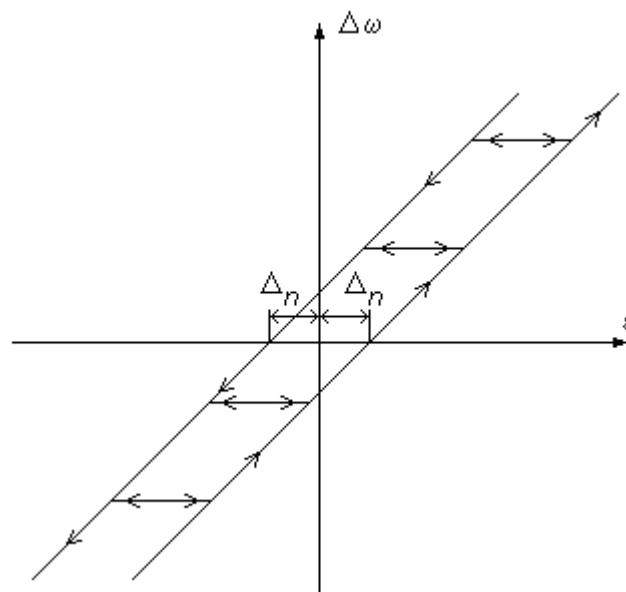


Рис. 2.7 Нелінійна ланка типу «люфт» у системі регулювання частоти обертання приводного двигуна електроустановки

Характеристика нелінійної ланки, що вводить обмеження рушійного моменту головного двигуна судна, наведено на рис. 2. 8.

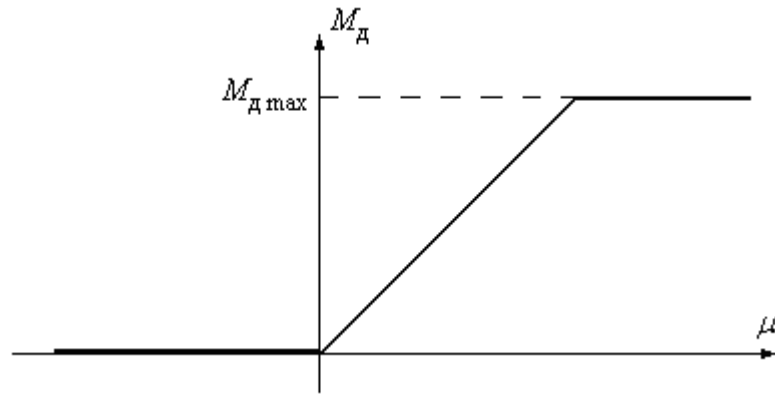


Рис.2.8 Нелінійна ланка типу «обмеження» у системі регулювання частоти обертання приводного двигуна електроустановки

Нелінійні обмеження рушійного моменту приводного двигуна визначаються особливостями його роботи: $0 \leq M_d \leq M_{d \max}$. Верхнє значення обмеження рушійного моменту $M_{d \max}$ визначимо на рівні 110% від номінального моменту приводного двигуна електроагрегату, $M_{d \max} = 1.1 \cdot M_{d \text{ ном}}$.

Генератор у схемі на рис. 2.6 представлений нелінійною залежністю між електромагнітним моментом, частотою обертання та навантаженням генератора $M_r = M(\omega_r, y_n)$. Тут $y_n = g_n + jb_n$ - провідність активного та індуктивного навантаження генератора.

Для електронного та гідравлічного регуляторів передатна функція $W_\omega(p)$ має різний вигляд.

Розрахунок перехідних процесів проводився за допомогою комп'ютерних програм, що містять моделі асинхронного генератора та дизельного приводного двигуна з електронним або гідравлічним регулятором частоти обертання.

Електронний та гідравлічний регулятори частоти обертання описуються різними передатними функціями. Електронний регулятор можна представити аперіодичною ланкою першого порядку

$$W_{\omega}(p) = \frac{K_{\omega}}{T_{\omega}p + 1} \quad (2.29)$$

Та відповідним рівнянням

$$T_{\omega} \frac{dh}{dt} = K_{\omega} \varepsilon - h, \quad (2.30)$$

де K_{ω}, T_{ω} - коефіцієнт посилення пропорційного регулятора та постійна часу виконавчого механізму.

Гідравлічний регулятор з виконавчим сервомотором, охопленим жорстким та ізодромним зворотними зв'язками можна представити наступними рівняннями [75]:

$$\begin{aligned} T_c \frac{dh}{dt} &= K_h \varepsilon - x - K_{oc} h; \\ T_u \frac{dx}{dt} &= K_u \frac{dh}{dt} - x, \end{aligned} \quad (2.31)$$

де K_h, K_{oc}, K_u - коефіцієнти посилення, жорсткої та ізодромної зворотних зв'язків, T_c, T_u - постійні часу сервомотора та ізодрому.

Передатна функція, що відповідає рівнянням (2.31) має вигляд:

$$W_{\omega}(p) = \frac{(T_u p + 1) K_h}{T_u T_c p^2 + (T_u K_{oc} + T_c + K_h) p + K_{oc}}.$$

Розроблена модель асинхронного генераторного комплексу дозволяє досліджувати процеси у різних суднових енергетичних установках: валогенераторах, турбогенераторах, допоміжних дизельгенераторах, аварійних генераторах.

На підставі викладеної моделі генераторного комплексу розроблено комп'ютерну модель мовою ПАСКАЛЬ, на якій проведено дисертаційні дослідження.

3. ДОСЛІДЖЕННЯ ДИСКРЕТНО-ІМПУЛЬСНИХ ЗАКОНІВ СТАБІЛІЗАЦІЇ НАПРУГИ АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

Особливості функціонування силової напівпровідникової техніки визначають вибір законів управління ними в класі дискретно-імпульсних систем. Такий вибір обґрунтований тим, що зміна стану тиристорних пристроїв відбувається, як правило, один раз за період змінної напруги і зазвичай синхронізовано з нею, [53]. Це стосується як керованих тиристорних випрямлячів з імпульсно-фазовим формуванням відкриваючих імпульсів, так і тиристорних комутаторів навантаження, реактивних елементів або керуючих обмоток генератора. У кожному випадку відбувається ступінчаста (дискретна) і періодична (імпульсна) зміна керуючого сигналу, що впливає на вихідну напругу генератора.

Регулятори напруги асинхронного генератора з короткозамкненим ротором і конденсаторним статорним збудженням також можна віднести до класу дискретно-імпульсних систем. Так, безпечна комутація конденсатора в мережі змінного струму без перезаряду можлива при рівності напруги мережі та конденсатора, що відбувається раз за півперіоду змінного струму. Тому період мережі визначає вибір тактової частоти імпульсної системи управління. Величина ємності збудження також дискретна і кратна мінімальній ємності конденсаторних батарей системи збудження генератора, [93].

Таким чином, керуючий вплив виявляється квантованим у часі з періодом, рівним періоду мережі. Причому швидкодія каналів управління напругою генераторів співвимірна з періодом мережі, тому нехтування дискретністю управління в часі може суттєво вплинути на результат дослідження динамічних властивостей генераторної установки.

Кількість блоків напівпровідникового комутатора конденсаторів обмежена вартістю силових елементів, і для забезпечення потрібної точності стабілізації напруги кількість розрядів керуючого коду регулятора становить 3-5 розрядів.

3.1 Аналіз способів керування напругою асинхронного генератора

Відомі способи зміни ємності регулюючих конденсаторних пристроїв шляхом широтно-імпульсної комутації одного блоку конденсаторів або перемиканням комбінацій з кількох секцій конденсаторів, [94, 95]. При цьому початкове збудження генератора здійснюється блоком конденсаторів, постійно з'єднаних зі статорними обмотками АГ, а управління напругою АГ при зміні його навантаження або частоти обертання забезпечується регулюванням ємності додаткових конденсаторів.

Відомий спосіб управління напругою асинхронного генератора [94], в якому комутація додаткового блоку конденсаторів здійснюється тиристорними ключами в моменти, коли напруга генератора виходить за встановлені межі. Конденсатори підключаються, коли напруга знижується нижче допустимого мінімального значення, а відключаються - при перевищенні напруги АГ максимального заданого значення.

При такому технічному рішенні реалізується двопозиційний спосіб регулювання, при якому відсутнє стабільне значення регульованого параметра: напруга генератора постійно зростає або знижується в установленому діапазоні, що створює модуляцію генерованої напруги, [53]. Амплітуда модуляції буде визначатися різницею максимального і мінімального заданого значення напруги. Частота перемикань буде залежати від величини комутованої ємності та ширини заданої зони регулювання. Модуляція напруги є основним недоліком такого способу управління.

Відомий також спосіб управління напругою АГ, реалізований в пристрої, [95]. Цей спосіб полягає в підключенні кількох секцій конденсаторів за допомогою тиристорних ключів залежно від величини зниження напруги генератора порівняно з заданим значенням. Виміряне датчиком напруга генератора подається на компаратори з послідовними порогами спрацьовування, які через дешифратор формують сигнал на включення чергової секції конденсаторів.

При зниженні напруги АГ компаратори послідовно спрацьовують і підключають чергові секції конденсаторів. Модуляція напруги при цьому усувається введенням петлі гістерезису в компараторах. Комутація конденсаторних блоків здійснюється трифазними електронними ключами у вигляді оптоелектронних трифазних реле змінного струму з контролем фази комутованої напруги через «нуль», що усуває перезаряд комутованих конденсаторів. Запропонований спосіб реалізує пропорційно-дискретний закон управління напругою генератора. Недоліком такого пристрою є низька точність стабілізації напруги через необхідність введення зон нечутливості на кожному порозі компаратора для усунення явища модуляції напруги.

Таким чином, відсутність ефективних технічних реалізацій систем управління напругою асинхронного генератора (АГ) з короткозамкненим ротором шляхом зміни ємності статорних конденсаторів обумовлює розробку способів зміни реактивної провідності пристроїв управління напругою АГ.

3.2 Розробка способу дискретно-імпульсної стабілізації напруги асинхронної генераторної установки

Запропонований новий спосіб і пристрій дискретно-імпульсної стабілізації напруги АГ, [96] метою якого є поліпшення якості регулювання напруги АГ, а саме підвищення точності стабілізації напруги при високій швидкодії та відсутності модуляції напруги в усталеному режимі.

У запропонованому способі стабілізації напруги АГ при обертанні генератора АГ приводним двигуном (ПД) початкове збудження забезпечується від постійно підключеного блоку конденсаторів C_0 , рис. 3. 1.

Величина ємності постійно підключеного блоку конденсаторів C_0 забезпечує задану напругу АГ на холостому ході при номінальній швидкості обертання приводного двигуна. При зміні навантаження або частоти обертання

генератора стабілізація напруги генератора забезпечується підключенням до статорних обмоток генератора N додаткових блоків конденсаторів. $C_1 \dots C_N$ в різних поєднаннях.

Задана напруга генератора вводиться в систему управління у вигляді задаючої напруги U_0 , а напруга генератора U_g вимірюється датчиком напруги протягом кожного періоду генерованого струму [99].

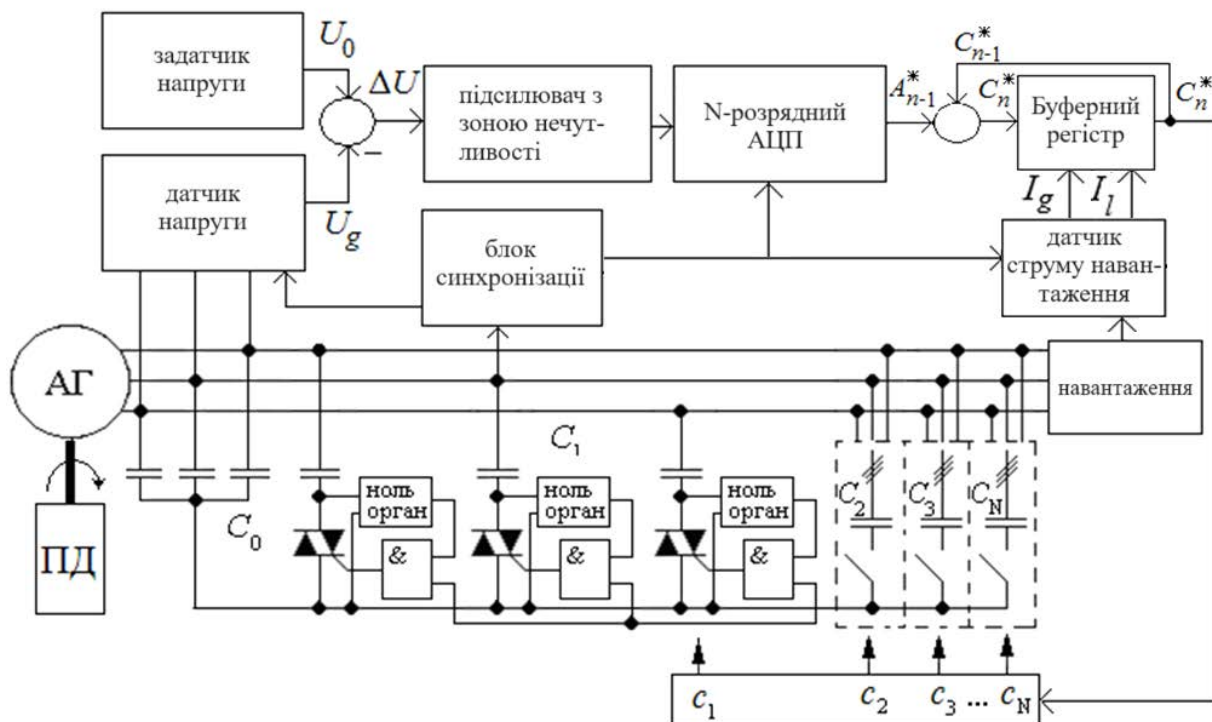


Рис.3.1 Пристрій стабілізації напруги асинхронного генератора

В кінці періоду вимірювання середнє за період напруга генератора U_g порівнюється із заданою напругою $\Delta U = U_0 - U_g$.

Якщо ця різниця ΔU більше або менше встановленої «зони нечутливості» $\pm \Delta/2$, тобто $\Delta U > \Delta/2$ або $\Delta U < -\Delta/2$, то відхилення від цієї зони $(|\Delta U| - \Delta/2)$ перетворюється на $n-1$ періоді управління в N-розрядне двійкове число A_{n-1}^* з певним коефіцієнтом пропорційності K . N-розрядне двійкове число A_{n-1}^* дорівнює цілій частині виразу $K \cdot (|\Delta U| - \Delta/2)$:

$$A_{n-1}^* = \text{Round}\{K \cdot (|\Delta U| - \Delta/2)\}$$

Якщо ж напруга генератора знаходиться в «зоні нечутливості» Δ , тобто $U_0 - \Delta/2 \leq U_g \leq U_0 + \Delta/2$, то число A_{n-1}^* дорівнює нулю. Число A_{n-1}^* один раз за період змінного струму генератора запам'ятовується і змінює керуюче двійкове число C_{n-1}^* , отримане під час попереднього періоду управління. Число A_{n-1}^* додається до керуючого двійкового числа C_{n-1}^* (за умови $\Delta U > \Delta/2$) або віднімається від числа C_{n-1}^* (за умови $\Delta U < -\Delta/2$) і формує нове двійкове керуюче число:

$$C_n^* = C_{n-1}^* + A_{n-1}^*. \quad (3.1)$$

Якщо в результаті цієї операції число C_n^* стає менше нуля, то йому присвоюється нульове значення. Якщо ж число C_n^* переповнюється, то йому присвоюється максимальне значення $2^N - 1$. Після цього число C_n^* запам'ятовується в буферному регістрі керуючого числа, див. рис. 3. 1.

Кожен розряд c_i двійкового керуючого числа C_n^* керує відповідними тиристорними ключами, які комутують один із блоків конденсаторів. Якщо $c_i = 1$, то тиристори i -го ключа відкриваються і підключають блок конденсаторів з ємністю C_i до статорних обмоток генератора, а якщо $c_i = 0$, то тиристори i -го ключа закриваються і відключають блок конденсаторів з ємністю C_i .

Для усунення перехідних комутаційних струмів сигнал на відпирання тиристора подається тільки в момент рівності нулю напруги на тиристорному ключі відповідної фази генератора. Запирання тиристора відбувається за відсутності відпирання сигналу та зменшення струму через нього до нуля.

Для забезпечення цифро-аналогового перетворення двійкового числа C_n^* у величину ємності збудження, співвідношення ємностей повинні відповідати вагам розрядів двійкового числа C_n^* , тобто $C_1 : C_2 : C_3 : \dots : C_N = 1 : 2 : 4 : \dots : 2^N$. Тоді

ємність збудження C_Σ буде змінюватися відповідно до двійкового керуючого числа C_n^* :

$$C_\Sigma = c_N \cdot C_N + \dots + c_3 \cdot C_3 + c_2 \cdot C_2 + c_1 \cdot C_1 + C_0 = \Delta C + C_0 \quad (3.2)$$

Для усунення модуляції регульованої напруги АГ величина «зони нечутливості» Δ має вибиратися дещо більшою, ніж відхилення напруги генератора ΔU_g при мінімальній зміні комутованої ємності (на величину C_1), яка відбувається при зміні керуючого числа на одиницю.

Приклад перетворення імпульсного інтегрального закону управління в N -розрядний цифровий закон управління показано на рис. 3.2. Було обрано для наочності. Околиця значень напруги навколо заданого розділена на зону нечутливості і рівнів (при знаходженні напруги на нижньому рівні за 1 період буде підключена максимальна ємність, на верхньому - повністю відключена).

Зона нечутливості введена для того, щоб запобігти коливанням напруги і повинна бути більше, ніж реакція системи на комутацію найменшого блока конденсаторів. В даному випадку зона нечутливості була обрана $\pm 2\%$.

Для того, щоб сформувати регулюючий вплив як комбінації включених конденсаторів, необхідно представити його в якості чотирирозрядного двійкового коду; кожен з розрядів може приймати значення 1 або 0 - відповідно включений або виключений. Таким чином, до старшого розряду підключається конденсатор з найбільшою вагою (0.4 о.е), до молодшого - з найменшою вагою (0.05 о.е).

На рис. 3. 2. в першому випадку виміряна напруга входить в зону нечутливості, тому регулюючий вплив дорівнює нулю. В другому випадку виміряна напруга перевищила задане значення на 9.5%, тому регулюючий вплив складе 8 десяткових одиниць, в двійковому вигляді 1 0 0 0 . В третьому випадку виміряна напруга менше заданого значення на 6.5%, тому регулюючий вплив складе 4 десяткових одиниць, в двійковому вигляді 0 1 0 0.

Описаний спосіб стабілізації напруги АГ реалізується схемою, представленою на рис. 3. 1.

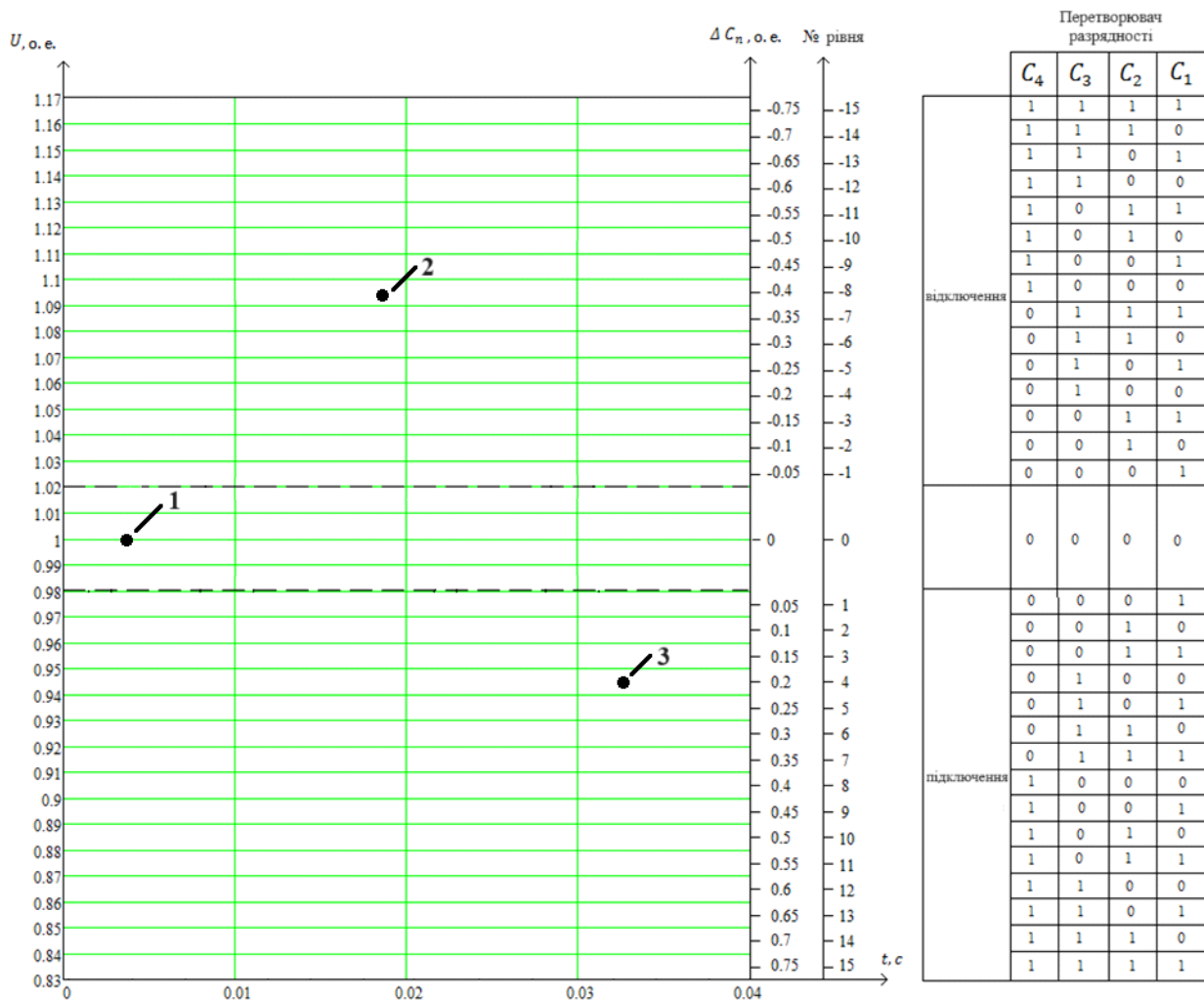


Рис.3. 2 Перетворення імпульсного інтегрального закону управління в чотирьохрозрядний цифровий закон управління

Напруга U_0 від задатчика напруги порівнюється елементом порівняння з напругою на виході датчика напруги U_g асинхронного генератора АГ. Їх різниця ΔU підсилюється підсилювачем із «зоною нечутливості» $\pm \Delta/2$, а потім перетворюється аналого-цифровим перетворювачем в N -розрядне двійкове число A_{n-1}^* , яке за допомогою блоку синхронізації один раз за період напруги АГ додається або віднімається з керуючого числа C_{n-1}^* , що зберігається в буферному

реєстрі (3.1). Таким чином, один раз за період керуюче число C_n^* оновлюється. Вихідні сигнали c_i буферного реєстра керують комутацією тиристорних ключів, що підключають i -ті блоки конденсаторів C_i до статорних обмоток АГ.

Для зменшення перехідних струмів заряду конденсаторів, сигнал керування на відпирання тиристорного ключа подається в момент рівності нулю напруги на ньому. Цей момент визначається за допомогою нульового органу тиристорного ключа, вихідний сигнал якого подається на один із входів елемента «І», на другий вхід якого подається керуючий сигнал c_i . В момент, коли $c_i = 1$ і напруга на ключі переходить через нуль, вихідний сигнал схеми «І» відпирає відповідний тиристорний ключ. У результаті ємність збудження змінюється раз за період до тих пір, поки напруга генератора U_g не увійде в «зону нечутливості».

Як показали дослідження, перехідний процес встановлення напруги в системі стабілізації напруги (рис. 3.1) триває 2-5 періодів струму, а модуляція напруги відсутня, рис. 3. 4 - 3. 5.

Статична точність регулювання напруги визначається «зоною нечутливості»: $|\Delta U| \leq \pm \Delta / 2$, яка обирається залежно від ємності блоку конденсаторів молодшого розряду C_1 , яка визначається з умови відсутності модуляції напруги.

Розрядність керуючого числа C_n^* і кількість комутуваних блоків конденсаторів N визначається з необхідного діапазону зміни ємності збудження ΔC і ємності молодшого розряду C_1 :

$$\frac{C_{\max}}{C_1} + 1 = 2^N \text{ або } N = \log\left(\frac{\Delta C}{C_1} + 1\right). \quad (3.3)$$

Величина діапазону зміни ємності збудження суттєво залежить від насичення асинхронної машини при номінальній статорній напрузі, рис. 3. 3.

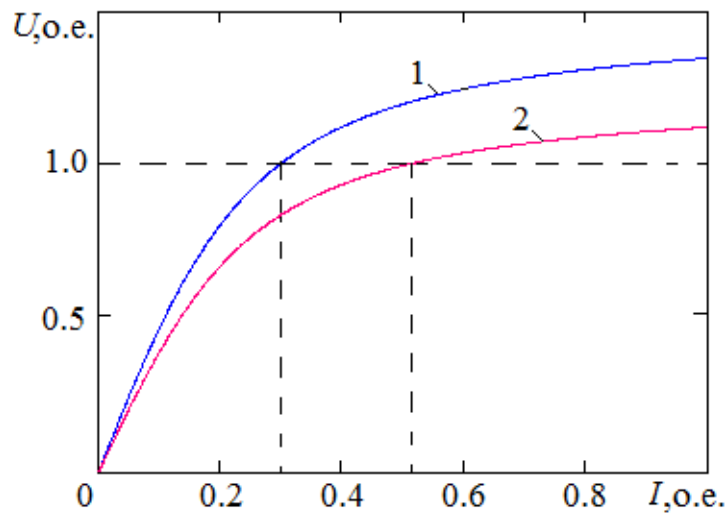


Рис.3. 3 Криві намагнічування асинхронної машини:
1 - асинхронний двигун; 2 - асинхронний генератор

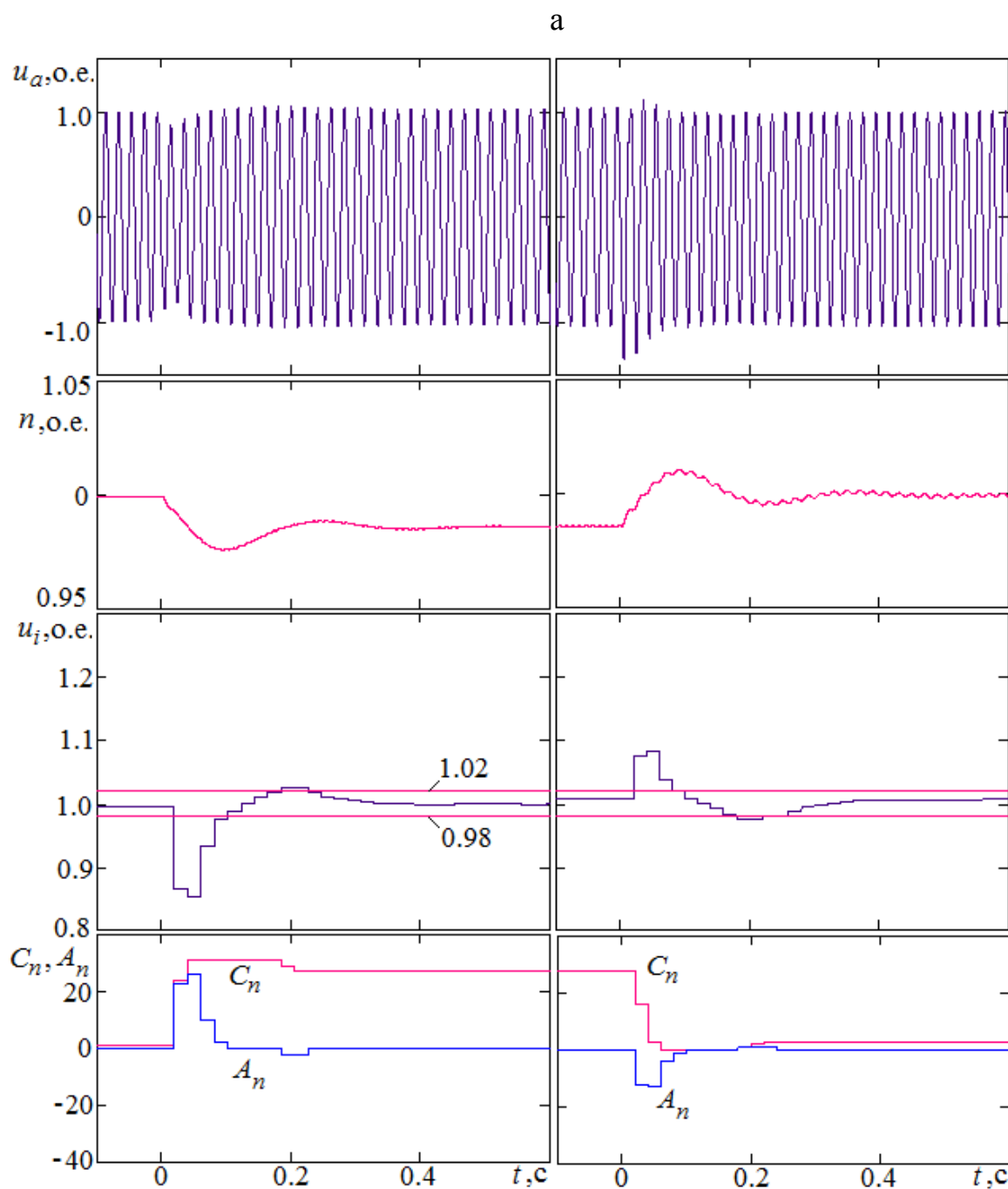
Наприклад, для точності стабілізації напруги машини серії АІР, що дорівнює $|\Delta U_g| = \pm 2\%$ при зміні 100% активно-індуктивного навантаження з $\cos \varphi = 0.8$ необхідно мати п'ять блоків комутованих конденсаторів (3.3), $N = 5$. При використанні більш насиченої асинхронної машини для роботи в режимі генератора для досягнення тієї ж точності достатньо мати чотири блоки комутованих конденсаторів, $N = 4$.

Тому можна розглядати два варіанти використання автономних генераторів з різними частотними навантажувальними характеристиками. У випадку відбору потужності валогенератором від головного двигуна частота його обертання може вважатися постійною. $n(t) = \text{const}$. А статизм або нерівномірність частотної характеристики допоміжного дизель-генератора судна дорівнює $\delta n = 2\%$, [76, 82, 83].

Напруга АГ U_g із конденсаторним збудженням суттєво залежить від частоти обертання $n(t)$, [53]. Тому при моделюванні та порівнянні варіантів використання дискретно-імпульсних систем стабілізації напруги із законом управління (3.1) розглянуто чотири варіанти їх використання: поєднання насиченої (рис. 3. 4) і ненасиченої (рис. 3. 5) асинхронної машини з «м'якою»

$\delta n = 2\%$ (а) и «жорсткою» $\delta n \approx 0$ (б) частотною характеристикою, рис.3.4-3.5.

На рис. 3. 4 і 3. 5 наведені результати моделювання перехідних процесів в АГ при включенні та відключенні 75% статичного активно-індуктивного навантаження. На осцилограмах у відносних одиницях показані: u_a - миттєва фазна напруга n - частота обертання ПД; u_i - сигнал датчика середнього за період напруги. C_n, A_n - десятичні значення керуючого коду та поточної помилки регулювання.



6

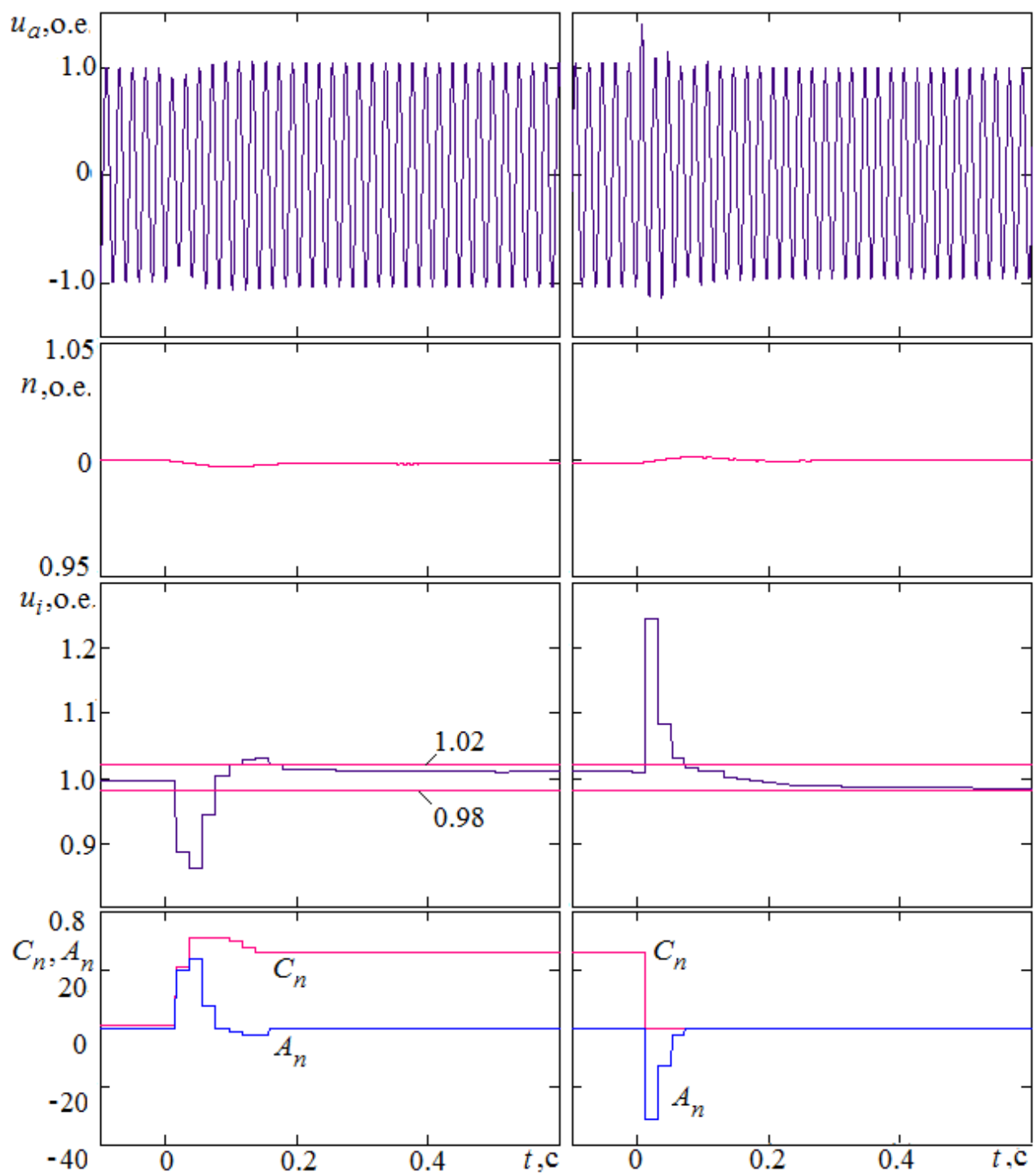
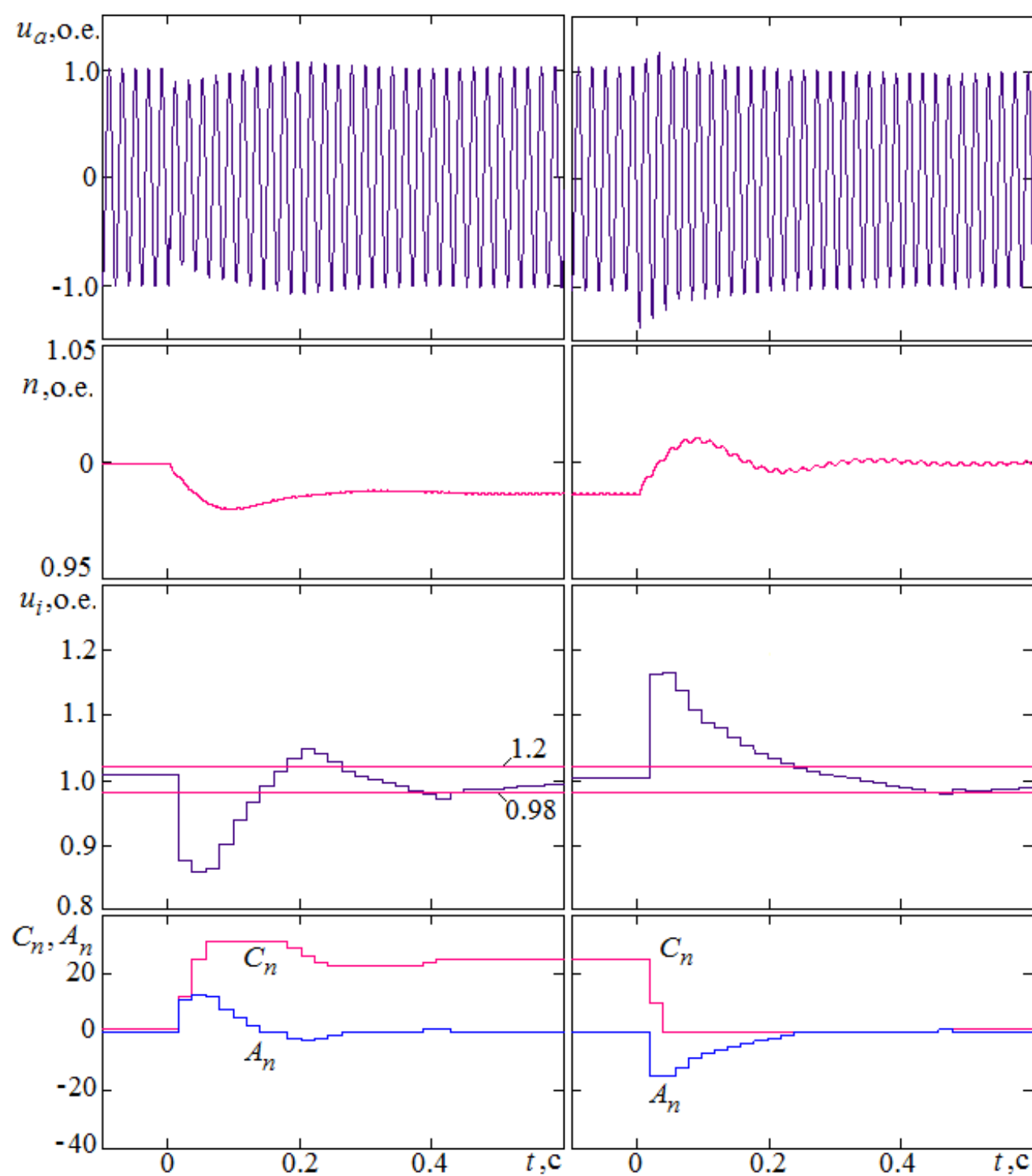


Рис.3.4 Комутиція 75% навантаження з $\cos(\varphi) = 0.8$ насиченого АГ

a



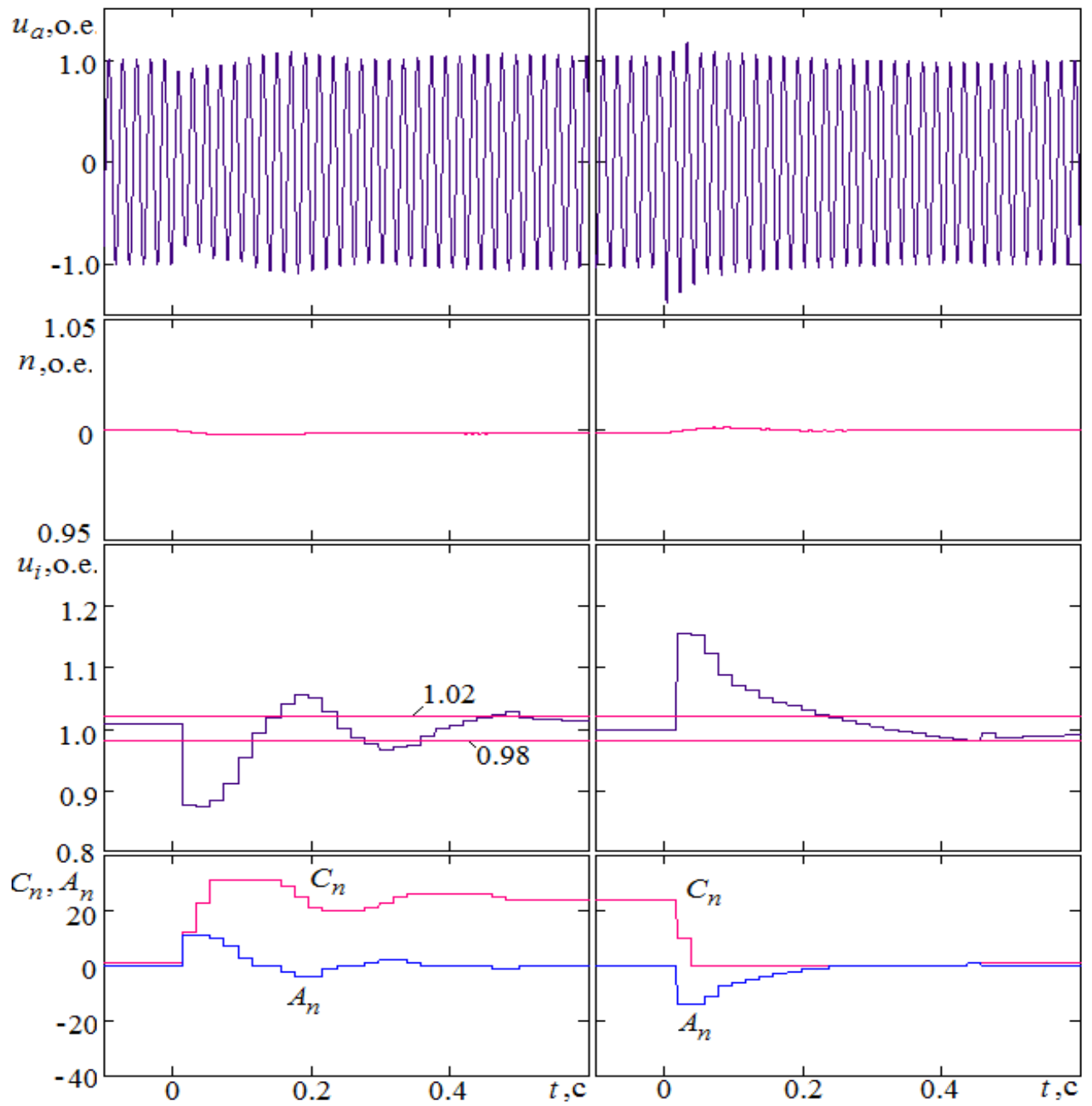


Рис.3.5 Комутація 75% навантаження з $\cos(\varphi) = 0.8$ ненасиченого АГ

3.3 Аналіз та оптимізація дискретних законів управління напругою асинхронної генераторної установки

У роботі [98] описано інтегральний дискретно-імпульсний закон управління, в якому двійкове число C_{n+1} , яке керує комутацією конденсаторних секцій в кожний період струму. $n+1$, визначається сумою двійкових чисел у попередньому періоді управління. n :

$$C_{n+1} = C_n + A_n. \quad (3.4)$$

Перехідні процеси в електроустановці з системою дискретної конденсаторної стабілізації напруги АГ досліджені на розробленій комп'ютерній моделі та експериментальній установці (розділ 5.3).

Розглянемо вигляд основних перехідних процесів і вплив налагодочних параметрів дискретно-імпульсного регулятора напруги на динамічні характеристики установки з АГ.

На рис. 3. 6 наведені динамічні процеси струму, напруги, ємності та частоти в відносних одиницях в асинхронній електроустановці при включенні 50% активно-індуктивного навантаження з $\cos \varphi = 0.8$. Тут в чотирьохрозрядному інтегральному регуляторі напруги (3.4) встановлена зона нечутливості $U_z = \pm 0.05$ і рівень дискретності регулятора $U_{ud} = 0.01$. Напруга потрапляє в зону нечутливості, і процес стабілізації закінчується за чверть секунди. Налаштувальними параметрами інтегрального дискретно-імпульсного регулятора є кількість розрядів і комутованих секцій конденсаторів N , зона нечутливості U_z и дискретність регулятора U_{ud} . Ємність C_1 , яка комутована першим розрядом керуючого числа C_n , повинна бути синхронізована з зоною нечутливості U_z .

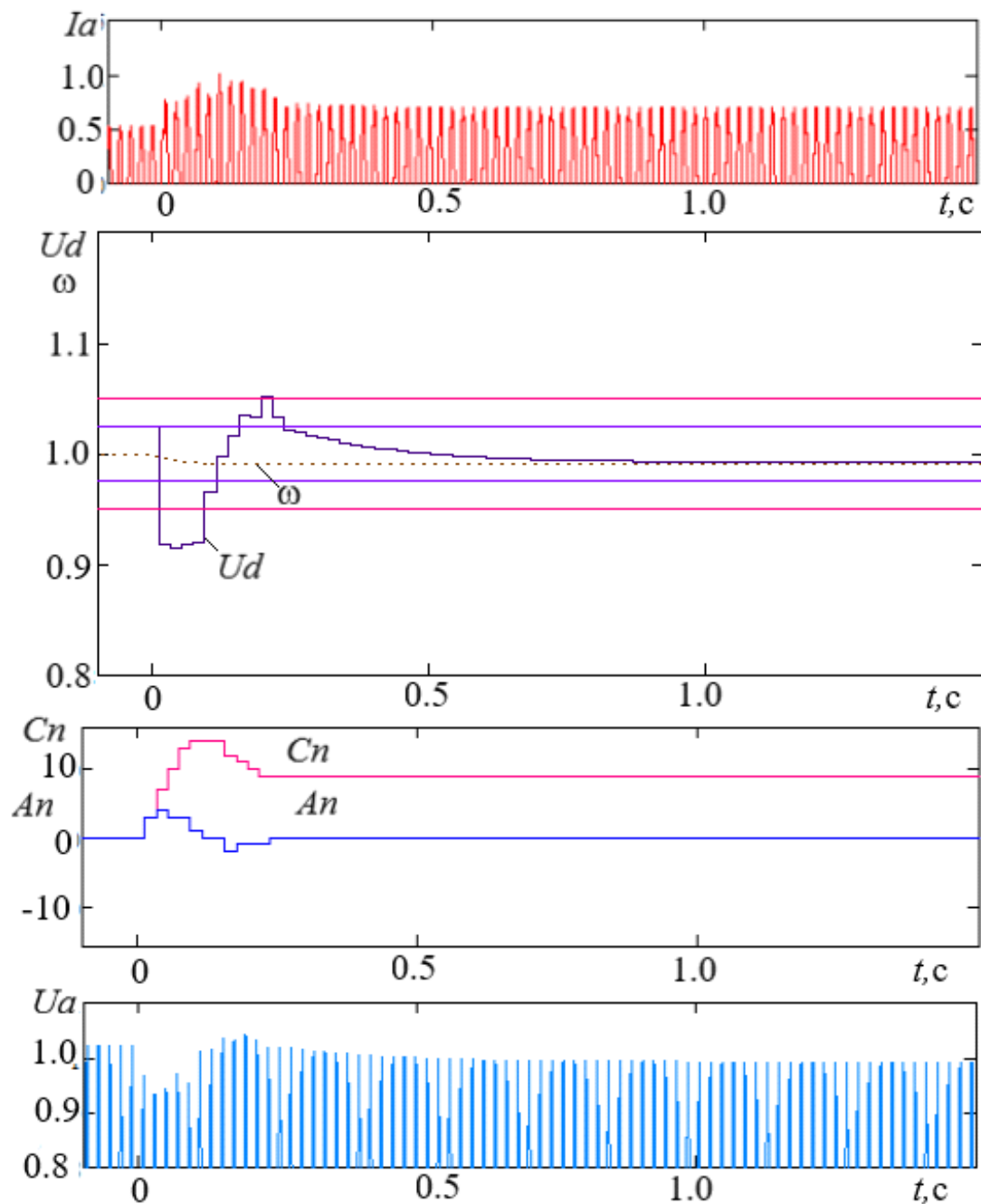


Рис.3. 6 Включення 50% активно-індуктивного навантаження з $\cos \varphi = 0.8$

На рис.3.6 I_a - струм фази генератора; U_d - вихід датчика напруги; ω - частота обертання приводного двигуна; C_n - число, яке керує ємністю; A_n - добавка ємності; U_a - напруга фази генератора.

На рис. 3. 7 наведені процеси регулювання напруги при включенні навантаження генератора з різними рівнями дискретності (чутливості) регулятора.

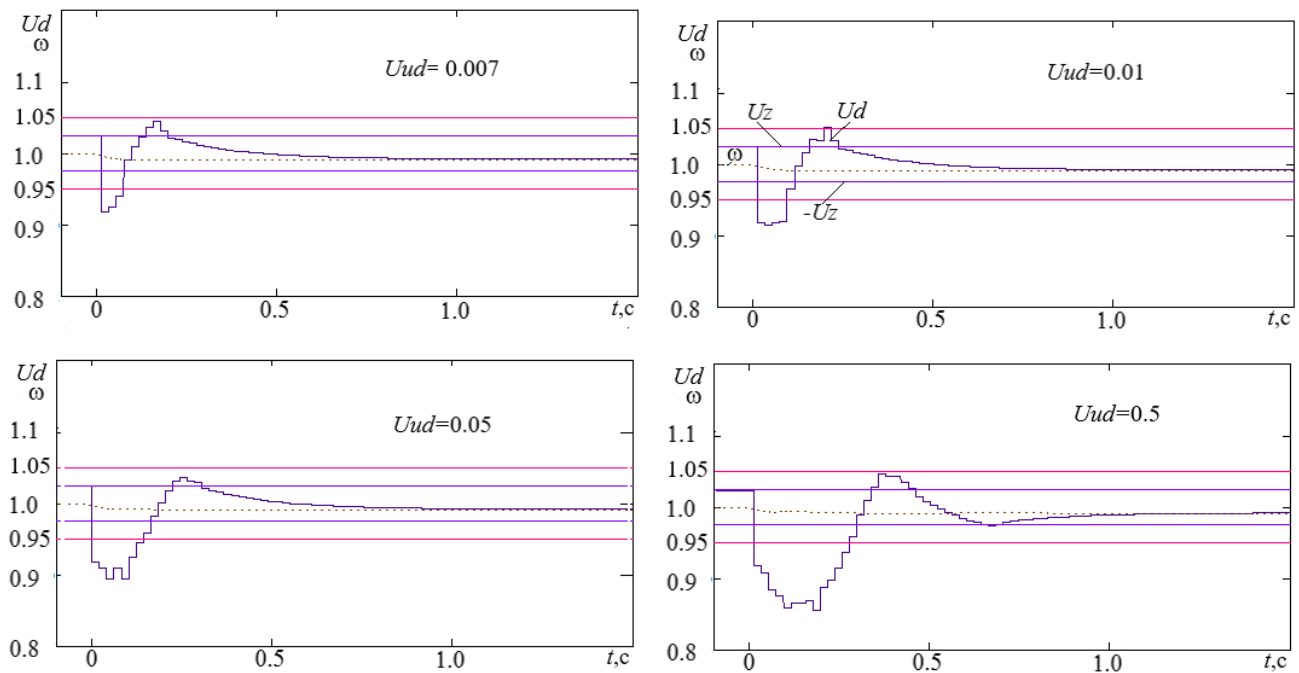


Рис.3. 7 Включення 50% активно-індуктивного навантаження з $\cos \varphi = 0.8$ при різних рівнях чутливості регулятора $U_{ud} = 0.007 \dots 0.5$

Чутливість регулятора U_{ud} істотним чином впливає на швидкість реакції на відхилення напруги та скорочує час перехідного процесу до 0,1...0,2 секунд. При $U_{ud} < 0.005$ система втрачає стійкість.

Точність стабілізації напруги в системі задається величиною зони нечутливості. U_z . На рис. 3. 6 і рис. 3. 7 $U_z = \pm 0.05$, тому точність стабілізації дорівнює $\pm 5\%$. Збільшення вдвічі статичної точності стабілізації вимагає зменшення в два рази ємності молодшого розряду та збільшення на одиницю кількості розрядів і секцій конденсаторів. Це суттєво збільшує вартість регулятора.

Якщо зміна напруги генератора при збільшенні ємності збудження на величину молодшого розряду C_1 більше зони нечутливості, у системі виникають автоколивання відносно зони нечутливості $\pm U_z$, рис. 3. 8.

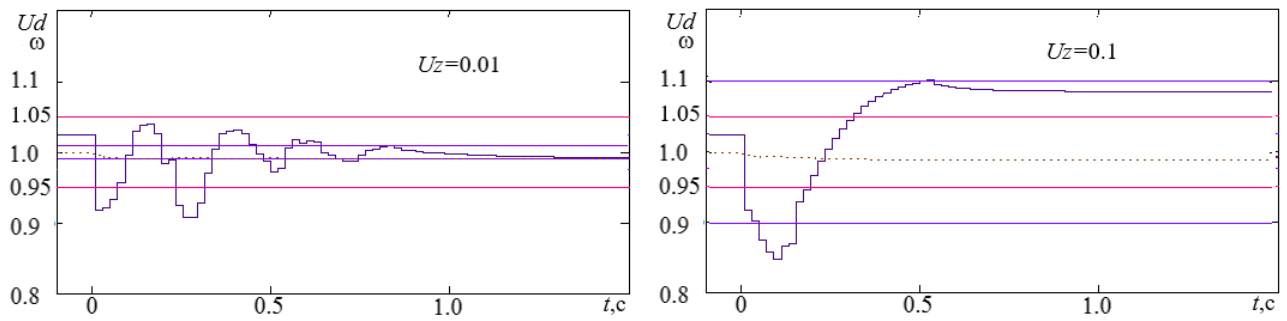


Рис.3. 8 Зменшення та збільшення зони нечутливості регулятора U_z

На рис.3. 9 наведені динамічні процеси встановлення напруги для різного комутованого навантаження в системі з інтегральним законом управління.

$$C_{n+1} = C_n + A_n.$$

Динамічне відхилення при комутації 25% навантаження становить 6...7%, при комутації 50% відхилення приблизно дорівнює 10...12%, а при 75...100% – близько 14...16%. Час входження напруги АГ в зону нечутливості не перевищує 0,3 секунди.

Момент комутації навантаження є випадковим, а управління синхронізується з мережею. Різниця цих моментів Δt знаходиться у межах періоду мережі: $\Delta t = 0...T_0$. Перехідний процес за напругою залежить від Δt , рис. 3. 10.

Різниця в процесах регулювання проявляється на ненасиченому ділянці кривої намагнічування заліза АГ, тобто при включенні навантаження та зменшенні напруги. Кількість коливань може бути від одного до трьох.

Бажання прискорити процес стабілізації при комутації великих навантажень і провалів напруги призводить до форсування управління шляхом нелінійного збільшення додавання конденсаторів, тобто числа A_n в законі управління (3.4).

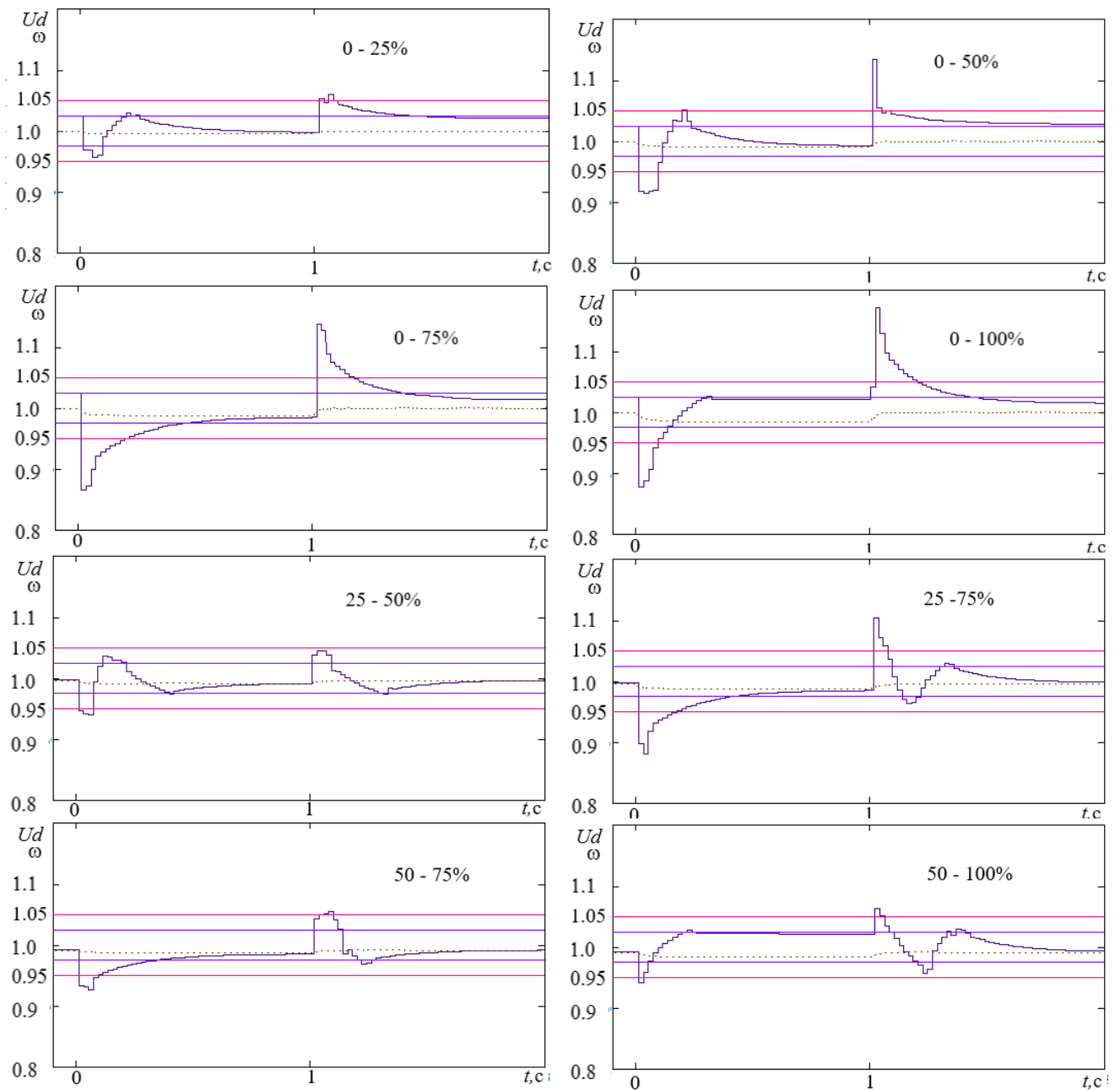


Рис.3. 9 Комутація різного активно-індуктивного навантаження з $\cos \varphi = 0.8$ в системі з інтегральним законом управління $C_{n+1} = C_n + A_n$.

Прискорення процесу стабілізації з форсуванням показано на рис. 3. 11. Тут у чотирьохрозрядному регуляторі $A_n = 8$ при $\Delta U < -4U_{ud}$ і $A_n = 12$ при $\Delta U < -6U_{ud}$.

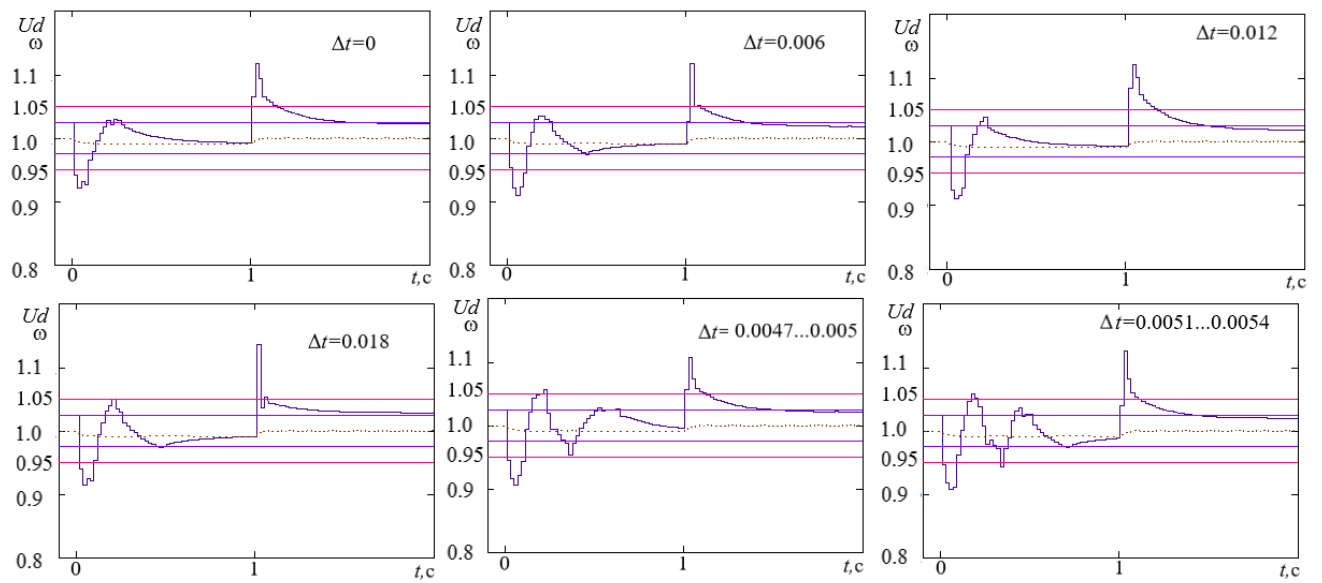


Рис. 3.10 Зсув моменту нанесення збурення

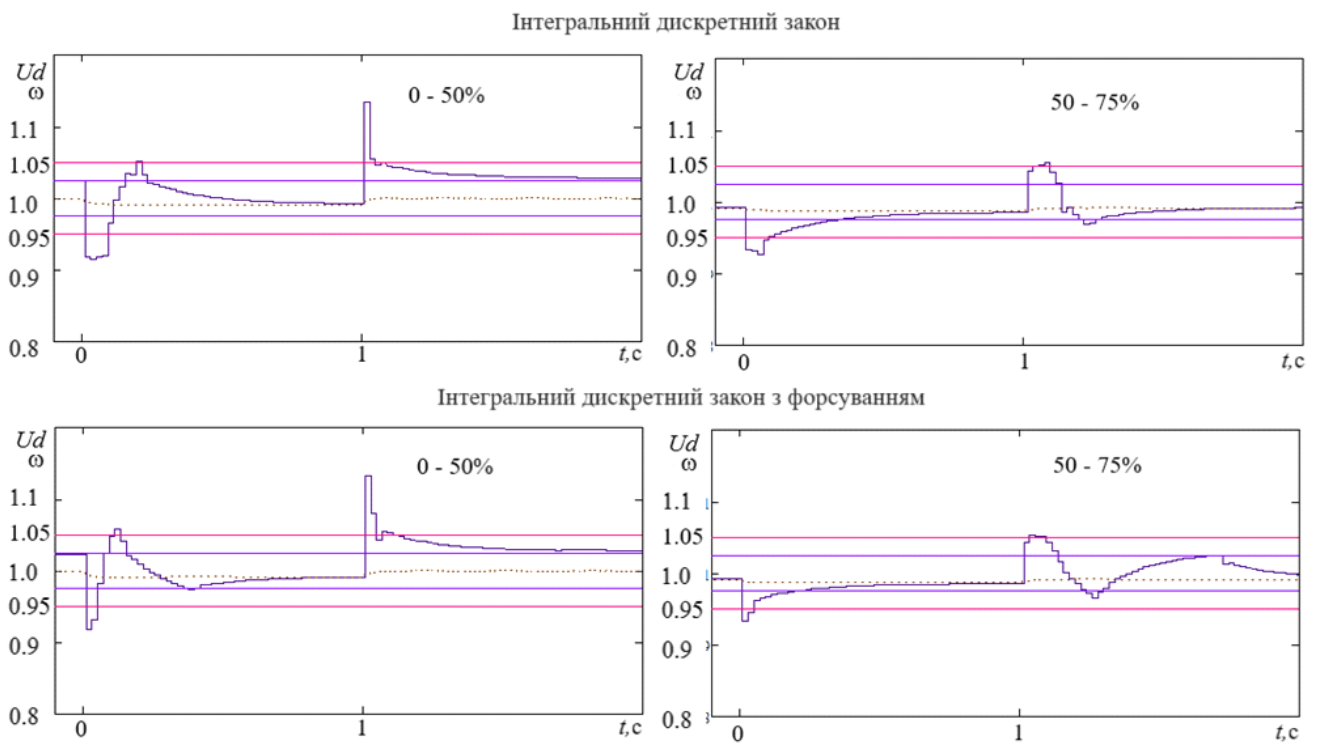


Рис.3.11 Форсування керування

Урахування швидкості зміни збурення виконується шляхом введення похідної в закон управління. У дискретному випадку швидкість зміни відхилення ΔU може бути врахована введенням у закон різниці відхилень на сусідніх тактах управління, наприклад:

$$C_{n+1} = C_n + 2A_n - A_{n-1} \quad (3.5)$$

У законі (3.5) реалізуються інтегрування та диференціювання відхилення напруги. Процеси комутації активно-індуктивного навантаження АГ з управлінням (3.5) наведені на рис. 3. 12.

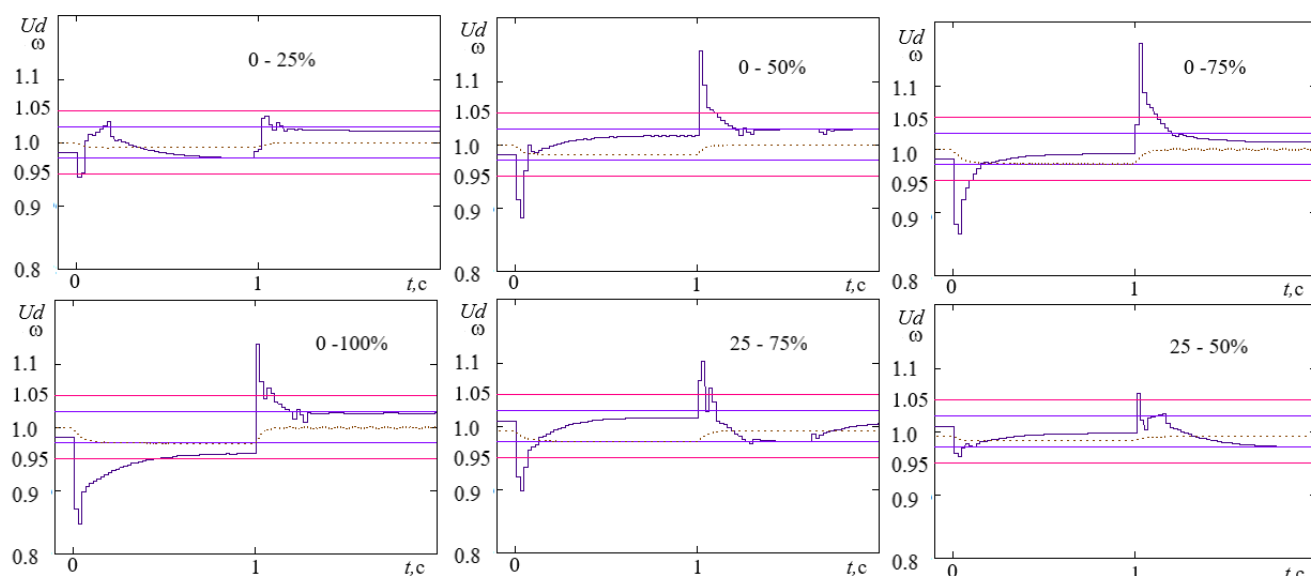


Рис.3.12 Цифровий інтегрально-диференціальний закон управління $C_{n+1} = C_n + 2A_n - A_{n-1}$

Порівняння процесів комутації 75% активно-індуктивного навантаження з застосуванням законів управління (3.4) та (3.5) показано на рис. 3. 13.

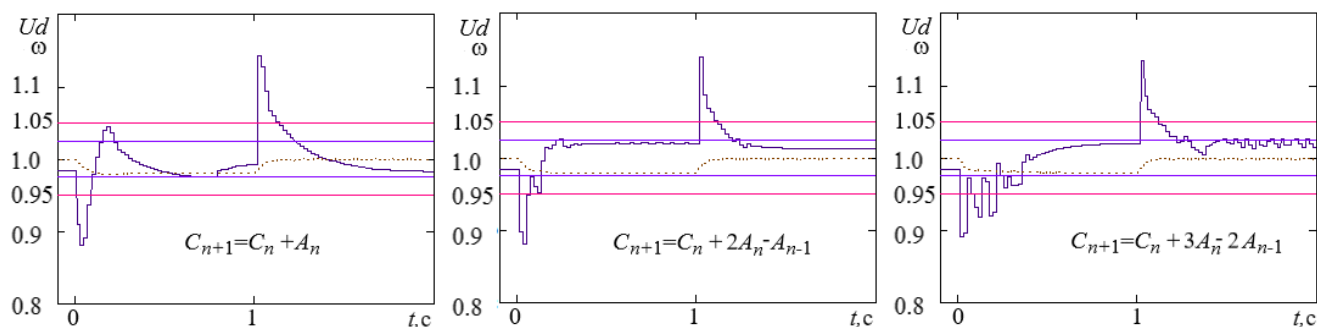


Рис.3.13 Порівняння дискретних законів управління

Збільшення диференціальної складової в законі $C_{n+1} = C_n + 3A_n - 2A_{n-1}$ призводить до неприпустимої коливальності перехідного процесу, рис. 3. 13.

Застосування комбінованого принципу управління за відхиленням регульованого параметра (напруги) та за збуренням (навантаженням) вимагає додаткового вимірювання струму навантаження протягом одного періоду напруги. T_0 , рис. 3.1. Вплив активного I_g і індуктивного I_l струму навантаження на напругу генератора U_g різне. Активне навантаження викликає реакцію якоря, а індуктивне навантаження розмагнічує генератор. Тому необхідно окреме вимірювання активного та реактивного навантаження. Закон комбінованого управління напругою має вигляд:

$$C_{n+1} = C_n + A_n + \text{Round}\left\{K_g(I_{gn} - I_{g(n-1)})\right\} + \text{Round}\left\{K_l(I_{ln} - I_{l(n-1)})\right\}, \quad (3.6)$$

K_g, K_l - налаштувальні коефіцієнти по активному та реактивному струму.

Порівняння процесів включення навантаження АГ з управлінням за відхиленням і з комбінованим законом управління наведено на рис. 3. 14.

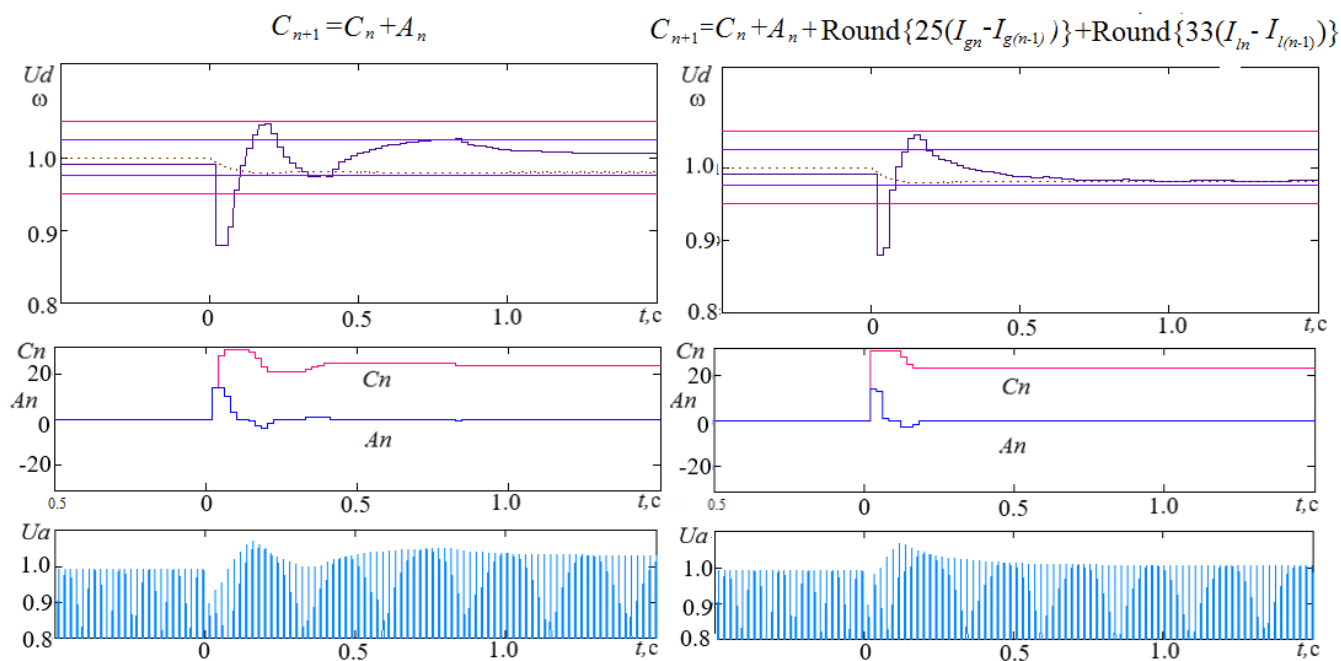


Рис. 3.14 Інтегральний та комбінований закони управління. Включення 75% активно-індуктивного навантаження з $\cos \varphi = 0.8$

Ускладнення закону управління шляхом врахування комутованого навантаження незначно поліпшило динамічні властивості системи.

Висновки.

1. Запропонований дискретно-імпульсний спосіб управління напругою АГ забезпечує високу швидкодію системи стабілізації напруги без модуляції в усталених режимах. Тривалість динамічного відхилення напруги при комутації активно-індуктивного навантаження не перевищує 0,1 с для насиченого та 0,2 с для ненасиченого АГ.

2. Дискретно-імпульсний закон (3.4) реалізує інтегральне управління за відхиленням напруги генератора. Правильний вибір його налаштувальних параметрів забезпечує відповідність вимогам нормативних документів до динамічних властивостей судової електроенергетичної установки [92].

3. При виборі налаштувальних параметрів регулятора напруги слід проаналізувати процеси при можливих змінах навантаження (дивись рис. 3. 9 та рис. 3. 12) та зсуви моментів її комутації (дивись рис. 10).

4. Поліпшення динамічних властивостей системи стабілізації напруги АГ з законом управління (3.4) досягається введенням форсування збудження при великих відхиленнях (дивись рис. 3. 11) та управлінням за швидкістю зміни відхилення (3.5) (дивись рис. 3.12 і рис. 3. 13). Ускладнення реалізації цих змін до закону (3.4) незначне і не потребує додаткового обладнання.

5. Реалізація комбінованого принципу управління за відхиленням і за збуренням (3.6) не призводить до суттєвих поліпшень динамічних властивостей системи стабілізації (дивись рис. 3. 14), але вимагає додаткових вимірювань і налаштувань регулятора.

4. ВИМІР НАПРУГИ ДЛЯ УПРАВЛІННЯ АСИНХРОННИМ ГЕНЕРАТОРОМ

Особливості суднової електроенергетичної системи, порівняно зі стаціонарними системами електропостачання, визначають їх статичні характеристики та динамічні перехідні процеси, які необхідно враховувати при їх проектуванні та експлуатації. Це пов'язано з більш швидкими змінами напруги та частоти при перемиканні споживачів, при включенні на паралельну роботу та при коротких замиканнях.

Малі сталі часу електричних кіл збільшують швидкість протікання електромагнітних перехідних процесів. Найменші маси дизельних, газових або парових приводних двигунів генераторів призводять до прискорених механічних процесів у суднових енергетичних установках.

Процеси намагнічування та розсіювання генераторів встановлюється за кілька періодів струму. Короткі лінії електропередачі суднової мережі менше обмежують максимальні значення струмів та електромагнітних моментів у перехідних процесах.

Тому управління процесами в суднових електроенергетичних системах через наявність великих динамічних навантажень, необхідність стабілізації напруги та частоти в допустимому діапазоні та забезпечення безперервності електропостачання має бути швидкодіючим.

Сучасні вимоги щодо скорочення викидів парникових газів в атмосферу та підвищення ефективності використання палива [68], зростаюча необхідність впровадження альтернативних джерел енергії та нових рішень щодо моніторингу та управління стають актуальними [102 - 104].

Тому вимоги до швидкодії систем керування напругою електроенергетичних установок є необхідними умовами їхньої ефективності.

4.1 Швидкодіючі датчики трифазної напруги

Розглянемо традиційні схеми вимірювання трифазної напруги, основними параметрами яких є швидкодія та точність. У найпростіших класичних випрямлювальних схемах датчиків напруги змінного струму ці вимоги є суперечливими. У таких датчиках основними елементами є діодні випрямлячі та вихідні ємнісні фільтри.

Амплітуда випрямленої напруги за відсутності фільтра дорівнює амплітуді фазної напруги змінного струму, а величина пульсацій дорівнює 100% амплітудного значення змінної напруги. Вихідний фільтр згладжує пульсацію напруги, але знижує швидкодію датчика.

Для трифазних випрямлячів ця проблему частково вирішується за допомогою шестикратного збільшення частоти пульсацій f_{Π} , рівної $f_{\Pi} = 6f_c = 300$ Гц. Це шестикратно підвищує швидкодію випрямного датчика напруги. З'ясуємо, як пов'язані суперечливі параметри датчиків: величина пульсацій p_c і час перехідного процесу t_{Π} при миттєвій ступінчастій зміні амплітуди трифазної напруги. Використовуємо моделювання в середовищі Proteus перехідних процесів в трифазних датчиках двох типів з однаковими вихідними ємнісними фільтрами зі сталою часу $T_{\Phi} = R1 \cdot C1$: із трьома фазними випрямлячами, рис. 4.1; за схемою Ларіонова, рис. 4.2.

Розглянемо перехідні процеси встановлення вихідної напруги датчика $u_{\text{вих}}$ та його пульсації p_c при симетричній ступінчастій зміні вхідної трифазної напруги $u_{\text{вх}}$. На рис. 4.3 та рис. 4.4 наведено процеси при миттєвому зменшенні трифазної напруги зі 100% до 80% номінального значення. Обидві розглянуті схеми датчиків є шестипульсними. Тому сталі часу T_{Φ} та пульсації у них p_c пов'язані однаковими залежностями, які наведені на рис. 4.5.

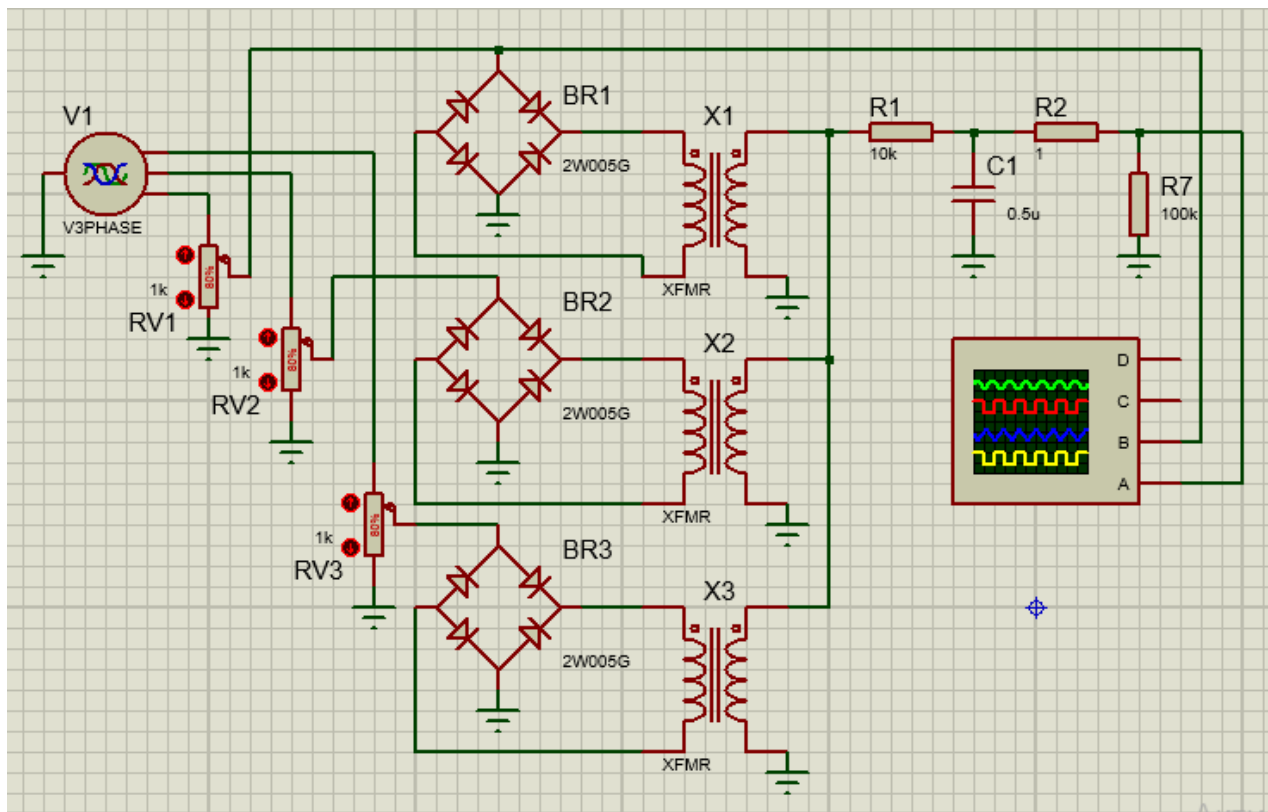


Рис.4.1 Схема моделі датчика трифазної напруги з трьома фазними випрямлячами

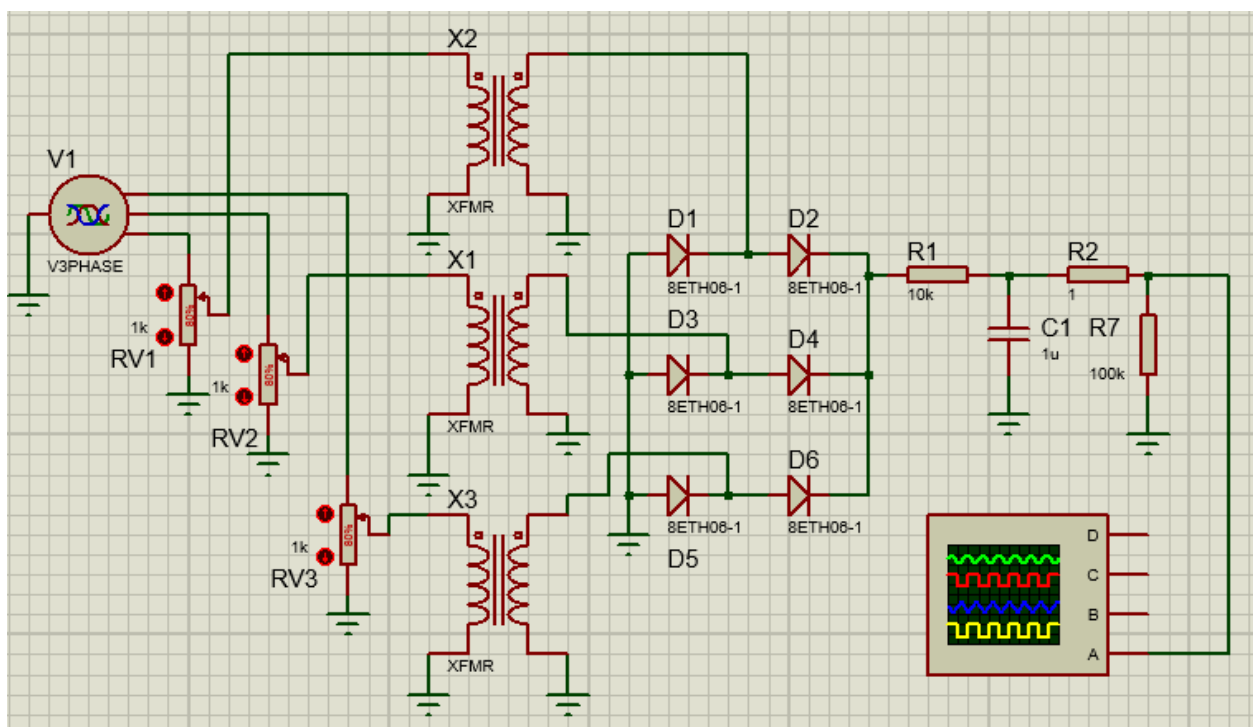


Рис.4.2 Схема моделі датчика трифазної напруги за схемою Ларіонова

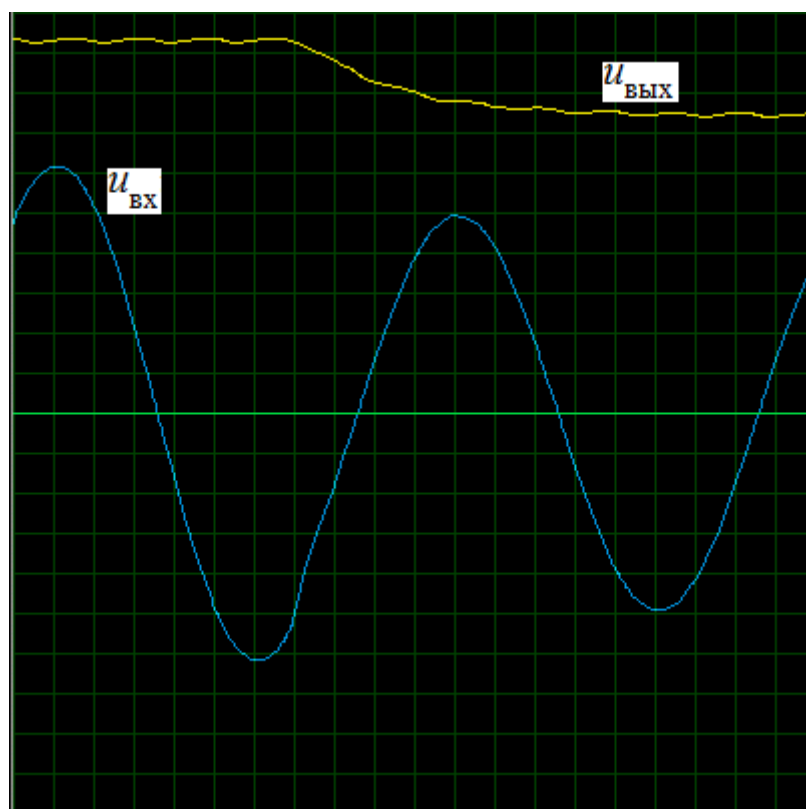


Рис.4.3 Перехідний процес встановлення вихідної напруги випрямного датчика трифазної напруги

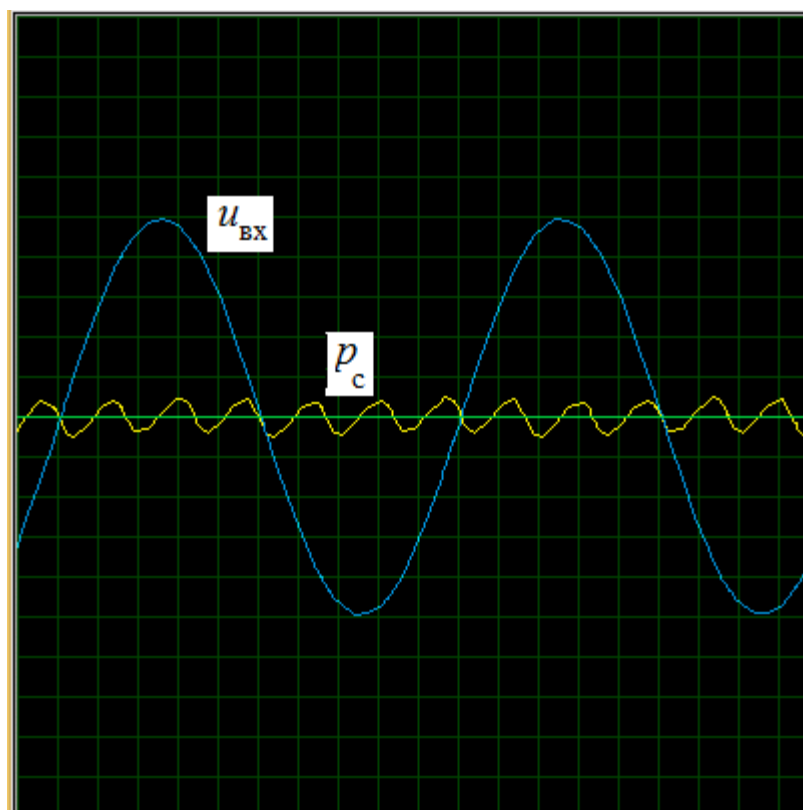


Рис.4.4 Пульсації вихідної напруги випрямного датчика трифазної напруги

Тут наведено відносні значення часу по відношенню до періоду мережі $T_c = 0.02\text{с}$ та пульсації напруги у відсотках відносної амплітуди номінальної напруги.

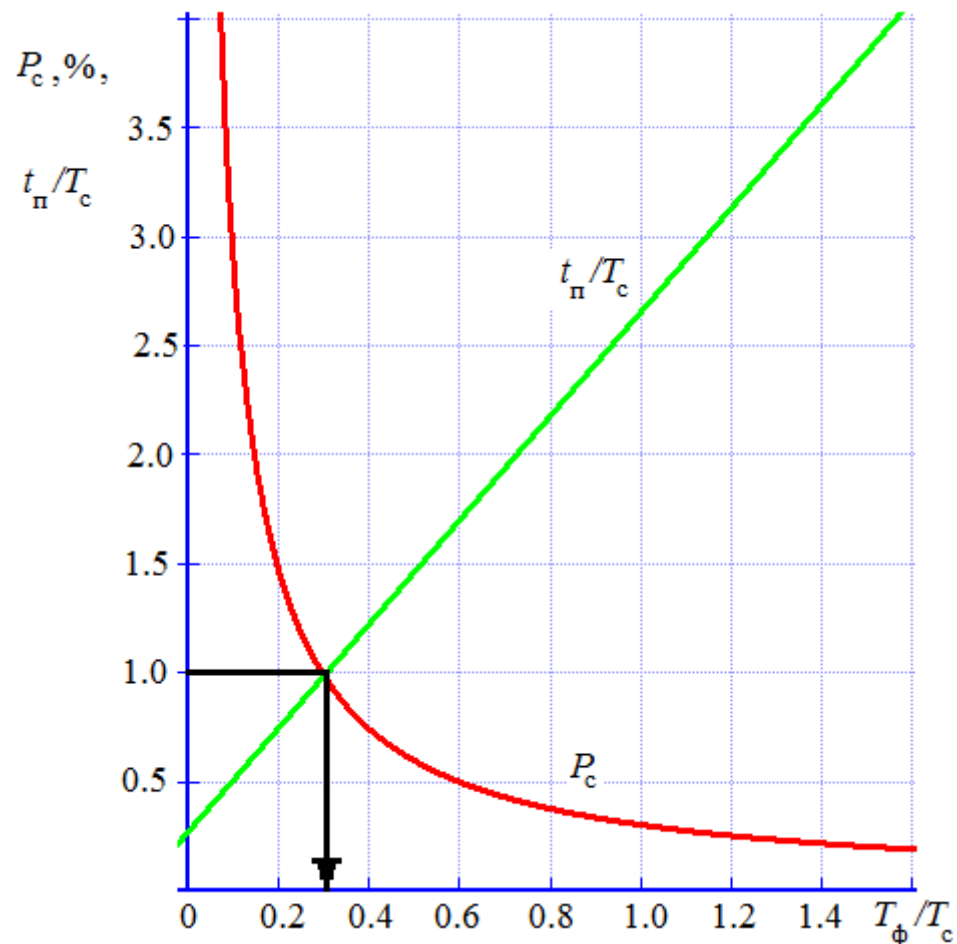


Рис.4.5 Відносні залежності часу перехідного процесу t_n / T_c та пульсацій P_c від сталої часу фільтра T_ϕ / T_c

Аналіз отриманих залежностей показує, що вимірювання трифазної напруги в аналізованих випрямних датчиках за період струму мережі дає амплітуду пульсацій в один відсоток номінальної напруги мережі, див. рис. 4.5.

Очевидно, такі пульсації датчика не дозволяє реалізувати системи стабілізації напруги високої точності.

Сучасні засоби дозволяють виміряти основні параметри електроенергії: частоти, напруги, активної, реактивної та повної потужності, а також їх динамічні відхилення.

Для суднових електроагрегатів проблемою залишається розробка датчиків трифазної напруги, що швидкодіють, які дозволяють точно і незалежно від інших параметрів вимірювати напругу протягом одного періоду.

Спотворення синусоїдальної форми напруги вимагають фільтрації, а значить і затримки в отриманні інформації. У існуючих системах стабілізації напруги автономних генераторів управління відбувається після згасання електромагнітних процесів у контурах розсіювання електричних машин та індуктивного навантаження, що збільшує динамічні відхилення напруги та знижує швидкодію системи.

Виходячи з вимог до якості електроенергії для різних споживачів, міжнародним стандартом ISO 8528-1 встановлено чотири класи застосування електроагрегатів: G1 – G4 [102].

Залежно від класу застосування до статичних і динамічних робочих діапазонів датчиків напруги автономних систем електропостачання стандартом ISO 8528-3 пред'являються різні вимоги, [103], табл. 4.1.

Очевидно, що датчики повинні мати межі вимірювань, що перекривають зазначені в табл. 4. 1.

На відміну від берегових систем електропостачання в суднових електростанціях, де приводом генераторних установок є двигуни внутрішнього згорання, у перехідних режимах та при паралельній роботі допускається значне відхилення частоти обертання генераторів та частоти струму, [104].

Стандарт допускає нестабільність від 0.6% до 3%. Тому тут повинен застосовуватися датчик напруги, вихідний сигнал якого мало залежати від частоти струму і від вищих гармонійних спотворень форми напруги.

Таблиця 4.1 Нормативні відхилення напруги автономних електроагрегатів

Найменування характеристики	Позначення	Одиниця вимірювання	Граничні робочі значення для класу за ISO 8528-1		
			G1	G2	G3
1. Відносний діапазон уставки напруги	δU_s	%	Не більше ± 5		
2. Усталене відхилення напруги	δU_{st}	%	± 5	$\pm 2,5$	± 1
3. Перехідне відхилення напруги при накиді навантаження	δU_{dyn}^-	%	-30	-24	-18
4. Перехідне відхилення напруги при скиданні навантаження	δU_{dyn}^+	%	35	25	20
5. Час відновлення напруги	t_U	с	Менше 2,5	Менше 1,5	Менше 1,5
6. Небаланс напруги	$\delta U_{2,0}$	%	1	1	1

Поширеним способом вимірювання змінної напруги з фільтрацією вищих гармонійних спотворень є інтегрування напруги протягом періоду або напівперіоду напруги, [107, 108].

$$u_{\text{ВЫХ}} = \int_0^{T_c} |u_c(t)| dt \quad \text{або} \quad u_{\text{ВЫХ}} = \int_0^{\frac{T_c}{2}} |u_c(t)| dt.$$

Однак значення інтеграла в кінці періоду інтегрування, кратного напівперіоду мережі, залежить від частоти струму ω_c

$$u_{\text{ВЫХ}} = \int_0^{\frac{T_c}{2}} |u_c(t)| dt = \int_0^{\frac{T_c}{2}} \left| U_m \sin \frac{2\pi}{T_c} t \right| dt = \frac{T_c U_m}{\pi} = \frac{2U_m}{\omega_c}. \quad (4.1)$$

Компенсувати залежність від частоти струму (4.1) можна, якщо попередньо продиференціювати, а потім випрямити фазну напругу [108]:

$$\begin{aligned}
u_{\text{вих}} &= \int_0^{\frac{T_c}{2}} \left| \frac{du(t)}{dt} \right| dt = \int_0^{\frac{T_c}{2}} \left| \frac{d(U_m \sin \frac{2\pi}{T_c}(t + \tau))}{dt} \right| dt = \\
&= \frac{2\pi U_m}{T_c} \left[\int_0^{\frac{T_c}{4} - \tau} \cos \frac{2\pi}{T_c}(t + \tau) \cdot dt - \int_{\frac{T_c}{4} - \tau}^{\frac{T_c}{2}} \cos \frac{2\pi}{T_c}(t + \tau) \cdot dt \right] = \quad (4.2) \\
&= U_m \sin \frac{2\pi}{T_c}(t + \tau) \Big|_0^{\frac{T_c}{4} - \tau} - U_m \sin \frac{2\pi}{T_c}(t + \tau) \Big|_{\frac{T_c}{4} - \tau}^{\frac{T_c}{2}} = 2U_m
\end{aligned}$$

Значення інтеграла (4.2) в кінці напівперіоду дорівнює подвоєній амплітуді напруги і не залежить від частоти та зміщення миттєвої напруги на довільний час τ . Застосовуючи принцип суперпозиції, підсумовуючи сигнали кожної фази, отримуємо сигнал виходу датчика в кінці напівперіоду пропорційний середньому значенні напруги трьох фаз. Цей спосіб вимірювання амплітуди змінної напруги легко реалізувати аналоговою схемою диференціювання, випрямлення та інтегрування змінної напруги, рис. 4. 6. Узгодження вхідної напруги датчика u_{in} та вимірюваної напруги мережі забезпечується вибором обмотувальних коефіцієнтів трансформатора $TR1$, диференціювання сигналу здійснює RC – коло $R2\ C2$, випрямлення – діодним мостом $VD3$. Інтегрування сигналу відбувається на операційному підсилювачі $DA2$, конденсатор зворотного зв'язку якого $C3$ шунтується польовим транзистором $VT1$. Управління транзистором $VT1$ виконується пов'язаним із мережею синхроімпульсом від операційного підсилювача $DA1$. Величина вихідної напруги датчика в кінці кожного періоду інтегрування пропорційна амплітуді вимірюваної напруги u_{in} , рис. 4.8, а мало залежить від частоти. Так при зміні частоти від 45 до 55 Гц, вихідна напруга змінюється приблизно на 0.3 %. Якщо вхідний сигнал лише випрямляти та інтегрувати, то характеристики датчика стають істотно залежними від частоти, рис.4. 8, б. У діапазоні 45-55 Гц напруга змінюється на 20%.

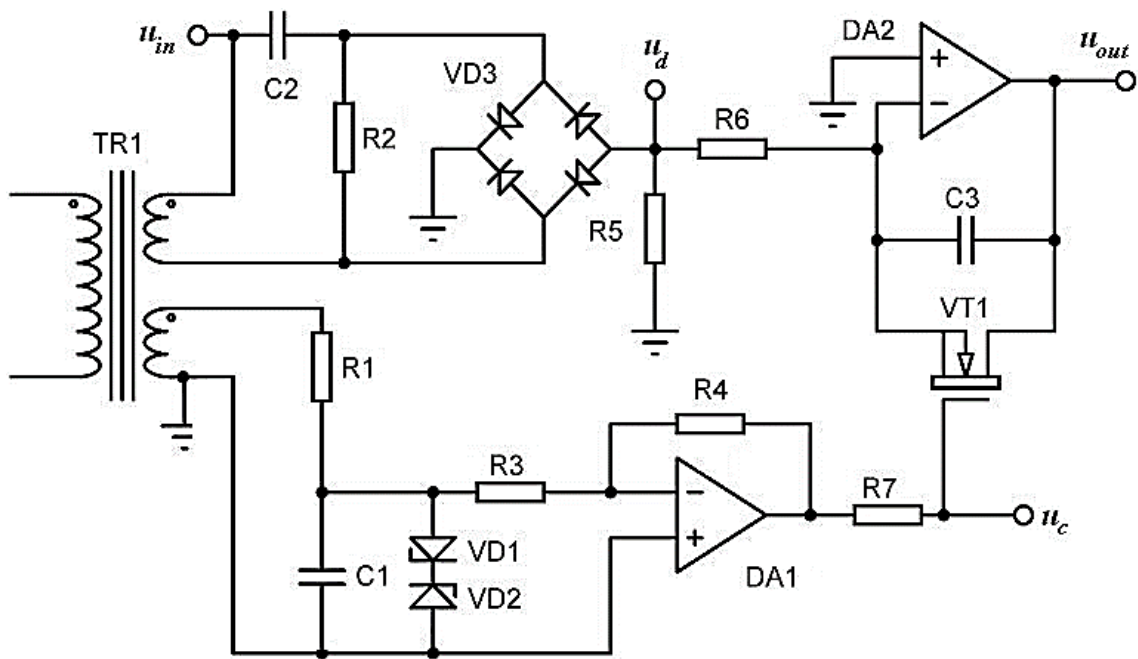


Рис.4.6 Аналоговий датчик змінної напруги

Роботу датчика пояснюють осцилограми, рис. 4.7.

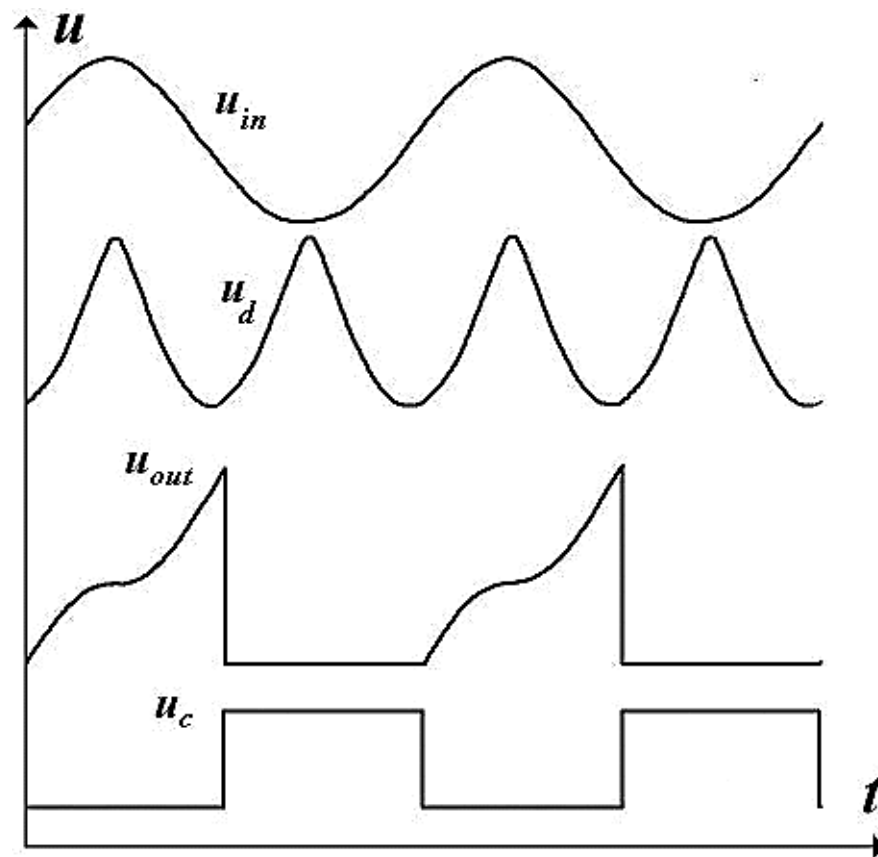


Рис.4.7 Осцилограми напруг датчика

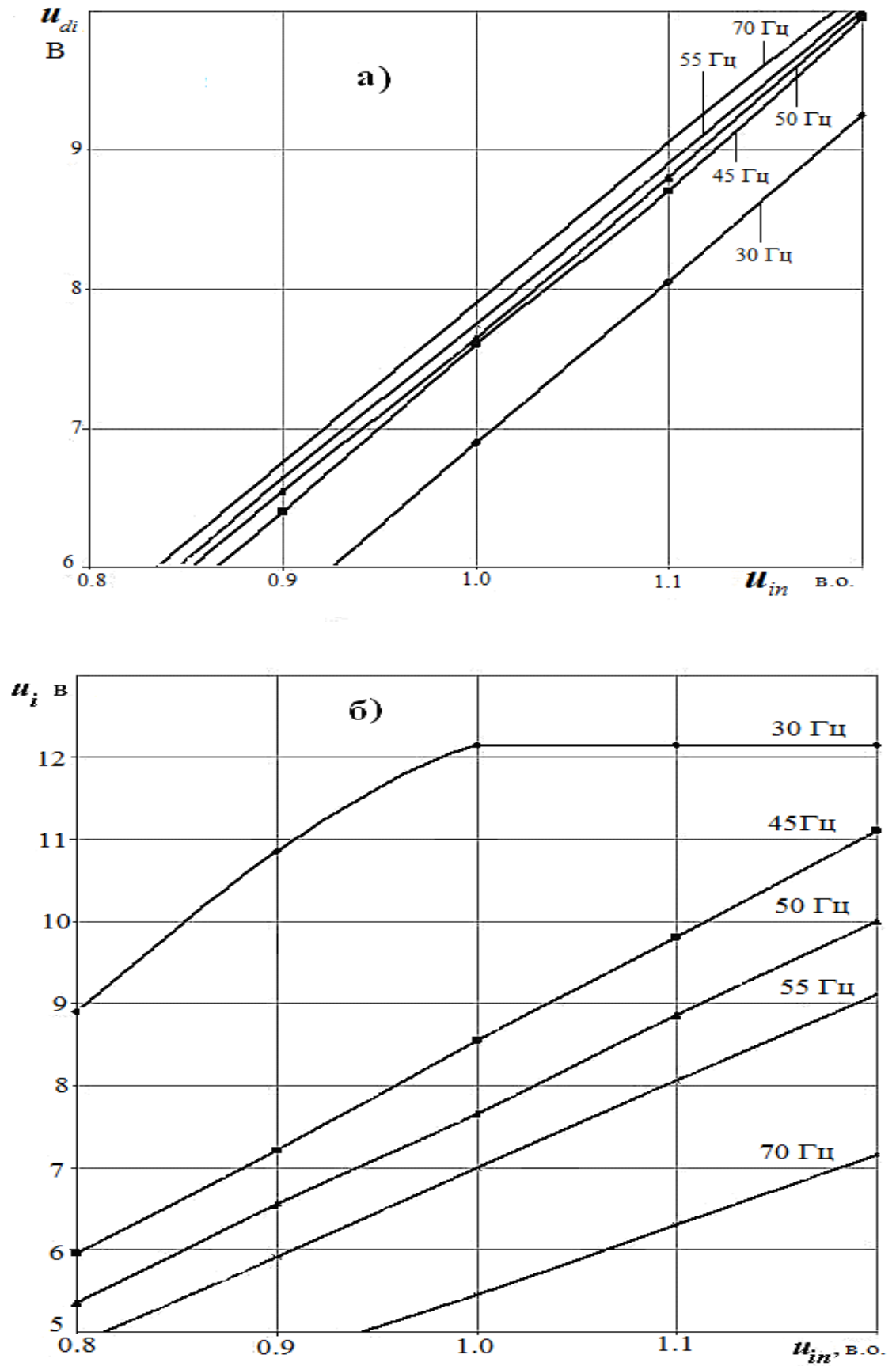


Рис.4.8 Залежність вихідної напруги датчика від амплітуди за різної частоти: а – з попереднім диференціюванням, б – без диференціювання

Порівняння частотних характеристик описаних способів вимірів наведено на рис. 4. 9.

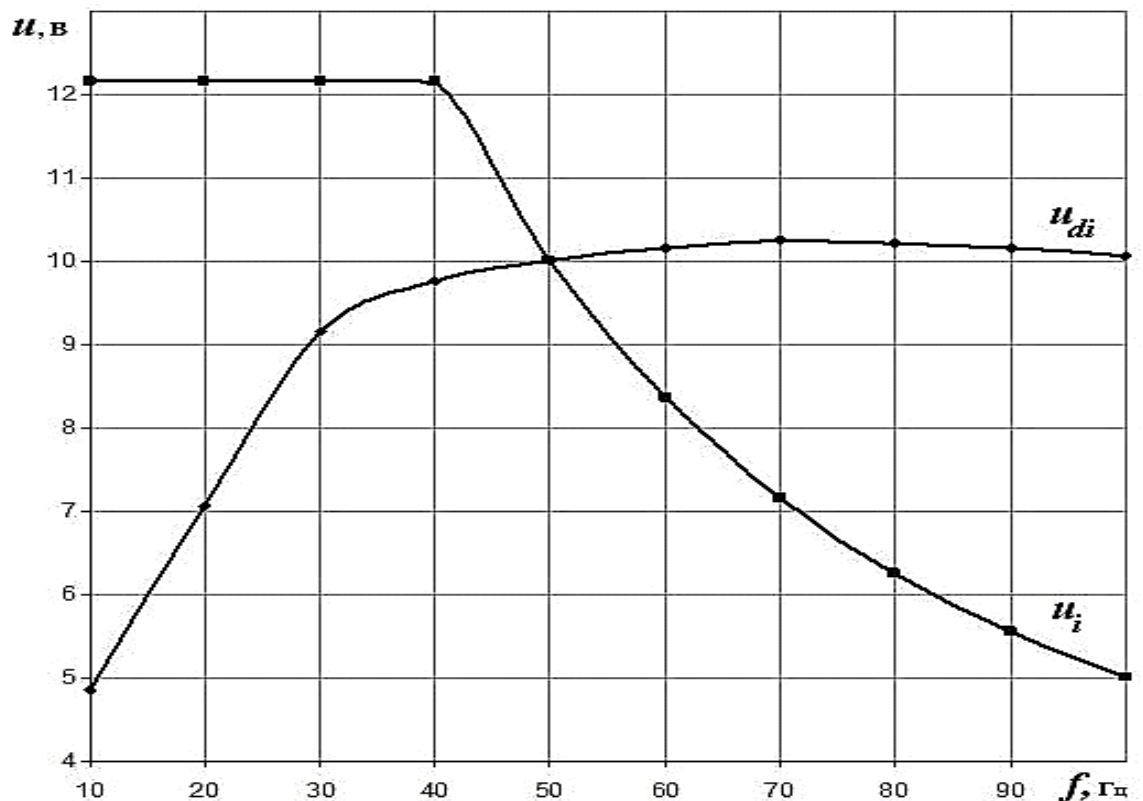


Рис.4.9 Порівняння способів виміру напруги змінного струму

Як видно з осцилограм, рис. 4. 7 в кінці процесу інтегрування значення вихідного сигналу датчика змінюється з найбільшою швидкістю, що створює проблеми для точного вимірювання його величини в кінці періоду інтегрування. Швидкість наростання вихідної напруги датчика кінці періоду інтегрування становить приблизно 16.4 %/мс, тобто. його зміна на 1% відбудеться за 60 мкс.

Тому для вимірювання та перетворення сигналу датчика з точністю більше одного відсотка період роботи АЦП має бути менше 60 мкс.

Форма вихідного сигналу датчика залежить від вибору періоду інтегрування по відношенню до вимірюваного змінного сигналу.

Схемна реалізація датчика на рис. 4.6 використовує використовує сигнал синхронізації моменту переходу вимірюваної напруги через нуль. Незалежно від того, коли виконується інтегрування, сигнал датчика в кінці періоду пропорційний амплітуді напруги.

Аналіз роботи датчика показує, що роботу інтегратора доцільно синхронізувати від напруги, зсунутої щодо вимірюваного на половину періоду. Для цього можна використовувати лінійну напругу двох інших фаз трифазної мережі або напругу на виході фазозсувного кола. Осцилограми роботи такого датчика показані на рис. 4.10.

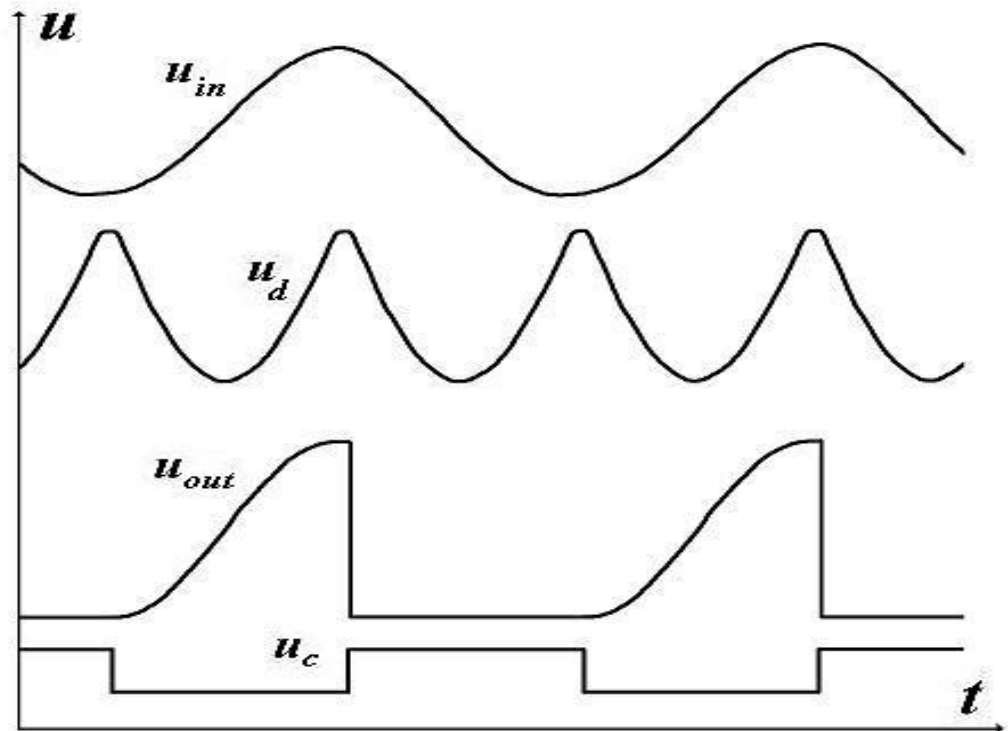


Рис. 4.10 Осцилограми напруг датчика, в якому інтегрування зсунуто щодо вимірюваної напруги на половину періоду

Наприкінці періоду вихідної напруги швидкість його зміни стає близькою до нуля, приблизно 2%/мс, що значно підвищує можливість точного перетворення цифрового сигналу і знижує вимоги до швидкодії АЦП. Для забезпечення точності в 1% період перетворення сигналу має бути меншим за 500 мкс.

Особливі властивості має запропонований метод вимірювання напруги змінного струму при його застосуванні для трифазної мережі. Диференціювання, випрямлення, підсумовування та інтегрування кожної фазної напруги протягом половини періоду дає практично лінійну форму вихідного сигналу датчика в

залежності від часу інтегрування. Нахил цієї характеристики пропорційний амплітуді змінної напруги генератора, рис. 4. 11.

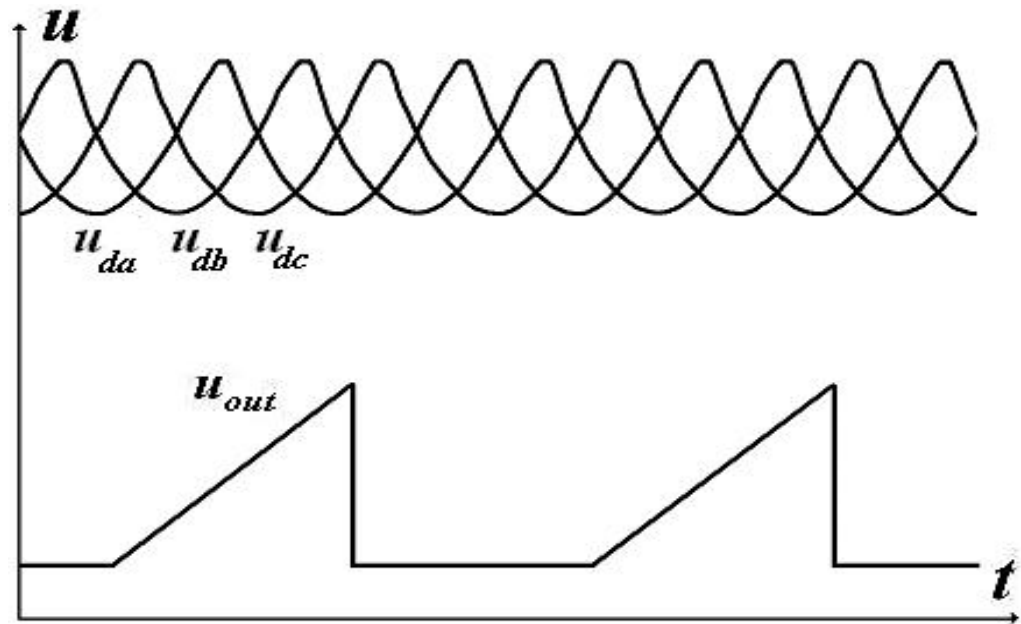


Рис.4.11 Осцилограми напруг трифазного датчика

Така характеристика датчика дозволяє вимірювати середню амплітуду фазної напруги практично протягом декількох циклів роботи АЦП. Лінійність форми вихідної напруги можна пояснити властивістю синусоїди бути близькою до лінійної функції при малих кутах фази.

Дисертантом виконано макетування та проведено дослідження характеристик описаного датчика, які узгоджуються з результатами розрахунків на моделі. Далі цей датчик використаний в експериментальній установці системи регулювання напруги асинхронного генератора.

Запропонована аналогова частина датчика легко поєднується з цифровою частиною системи керування. Достатньо один раз запустити АЦП наприкінці періоду інтегрування, тим самим перетворити сигнал датчика на код.

4.2 Цифровий датчик трифазної напруги

У сучасних датчиках змінної напруги використовують обчислювальні можливості вбудованих контролерів. Існують різні способи виконати ці обчислення. Можливість використання швидкодіючих аналого-цифрових перетворювачів для вимірювання миттєвих значень фазної напруги дозволяє обчислювати будь-які параметри трифазної напруги.

В даний час такі контролери залишаються дорогими, тому доцільно знайти ефективну комбінацію аналогових перетворювачів і доступних контролерів з невеликою оперативною пам'яттю, що не обчислюють нелінійні функції. Наприклад, Arduino: ATmega328, ATmega 168..., ESP8266, ESP32 та інші.

Процес інтегрування вимірюваного сигналу досить просто реалізується програмно в цифровій частині датчика шляхом підсумовування після диференціювання та випрямлення сигналів фазних напруг.

Синхронізація роботи датчика з електроенергетичною мережею також легко реалізується контролером шляхом порівняння миттєвого сигналу однієї із фаз із заданим постійним рівнем.

У той самий час, операції диференціювання і випрямлення реалізуються локальними радіoeлементами за допомогою конденсаторів, резисторів і діодів, тобто. без мікросхем, що містять операційні підсилювачі. Це дозволяє оптимізувати співвідношення аналогової та цифрової частини датчика за критерієм простоти реалізації. Така схема трифазного датчика напруги наведено на рис. 4.12. Електрична розв'язка, диференціювання та випрямлення фазних напруг виконуються аналоговою частиною схеми, а інтегрування та синхронізація реалізуються контролером.

Трансформатори TR1-TR3 знижують напруги фаз і забезпечують електричну розв'язку силових та вимірювальних кіл. Конденсатори C1-C6 та резистори R1, R2, R4, R5, R7, R8 виконують диференціювання, а діоди D1-D6 - випрямлення фазних напруг. Далі аналогові сигнали подаються на аналогові порти A1-A3 контролера.

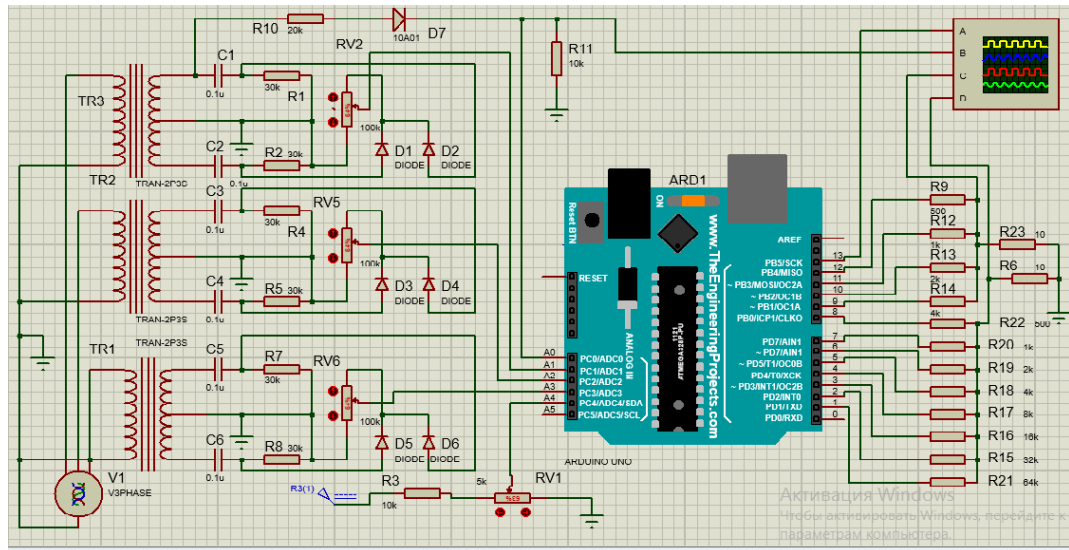


Рис.4.12 Схема моделювання та реалізації датчика трифазної напруги з цифровим інтегруванням

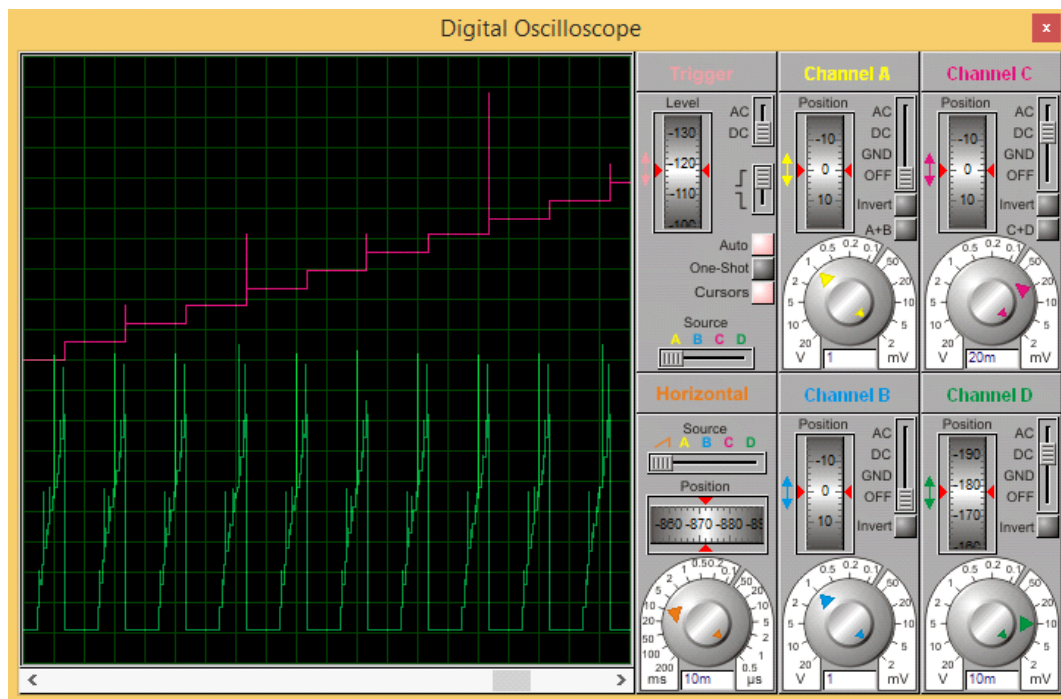
Інтерфейс контролера з 1 по 8 клеми виводить байт інформації від датчика напруги в цифровому вигляді, а на резисторах R15-R22 і R6 виконується цифро-аналогове перетворення вихідного сигналу датчика напруги трифазного кола.

Для синхронізації з напругою мережі використовується резисторно- діодний дільник R10-D7-R11, вихідний сигнал якого надходить на порт A0. Сформований контролером синхроімпульс підключений до висновку 13. На рис. 4.13 показано роботу датчика напруги та регулятора з інтегральним законом управління.

На контролері реалізований цифровий інтегральний регулятор – висновки 9-12. Цифро-аналогове перетворення сигналу регулятора виконано на резисторах R9, R12-R14 та R23. Завдання в регулятор вводиться в контролер за допомогою резисторів R3 і RV1 через порт A4.

При моделюванні та налаштуванні програмного коду на виходах 1-8 можна виводити внутрішні змінні програми. Наприклад, на рис. 4.13 показано роботу датчика напруги та регулятора з інтегральним законом управління. На рис. 4.13, а,б верхня діаграма відбиває вихідний сигнал інтегрального регулятора, а нижня діаграма ілюструє результат програмного інтегрування сигналу датчика трифазного кола.

a



б

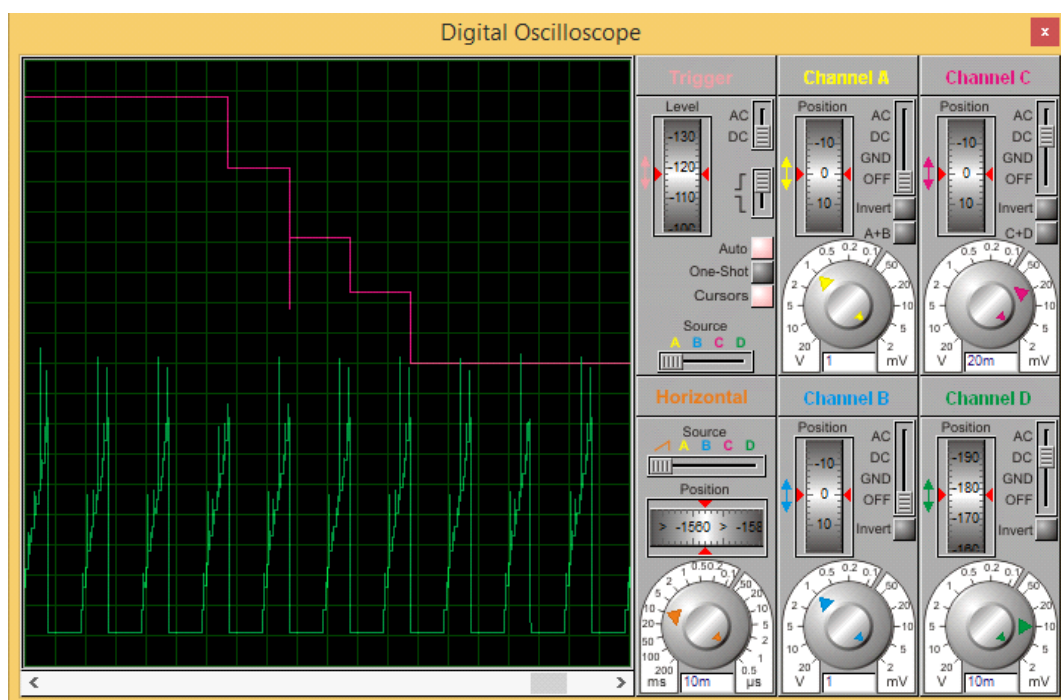


Рис.4.13 Осцилограми вихідних сигналів інтегрального регулятора

а - збільшення керуючого впливу з мінімальною інтенсивністю

б - зменшення керуючого впливу з потрібною інтенсивністю

Цифрове інтегрування сигналу датчика трифазного кола та формування синхронізуючого імпульсу дозволяє поєднати аналогову та цифрову частини датчика. Аналогова підготовка сигналу напруги генератора до використання в цифровому регуляторі збудження спрощують програмну реалізацію алгоритму управління напругою генератора.

4.3 Аналоговий датчик трифазної напруги для системи стабілізації напруги асинхронного генератора

У процесі розробки системи стабілізації напруги асинхронного генератора з'ясувалося, що вимірювання трифазної напруги асинхронного генератора протягом половини періоду ефективніше виконувати аналоговим датчиком, описаним у попередньому розділі, але з аналоговим підсумовуванням і інтегруванням фазних сигналів на конденсаторі, схема якого наведена на рис. 4.14.

На рис. 4.15 наведена осцилограма процесу вимірювання напруги при його ступінчастій зміні зі 100 до 80% від номінального.

У датчику, наведеному на рис. 4.14, період вимірювання та управління напругою розділені і виконуються по черзі протягом половини періоду струму, що генерується.

Синхронізація датчика з мережею, виділення та запам'ятовування піків наприкінці періодів вимірювання, а також побудова системи керування напругою генератора з цифровим регулятором реалізована з використанням поширеного контролера Arduino UNO, рис. 4.16.

Перетворення цифрового сигналу управління в аналоговий виконується на виході контролера за допомогою цифро-аналогової схеми на резисторах R3-R5, R11-R12. Диференціювання фазних напруг реалізується RC-колами C3R9, C6R14, C2R17.

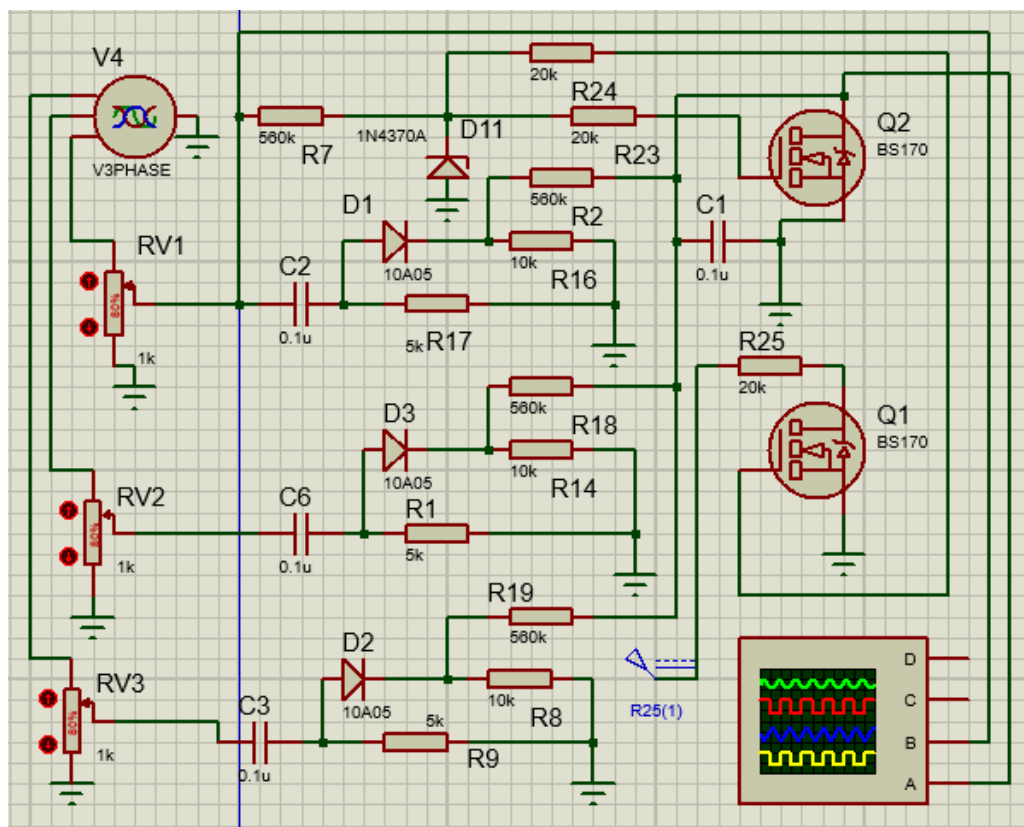


Рис.4.14 Схема та модель на Proteus швидкодіючого аналогового датчика напруги трифазної напруги

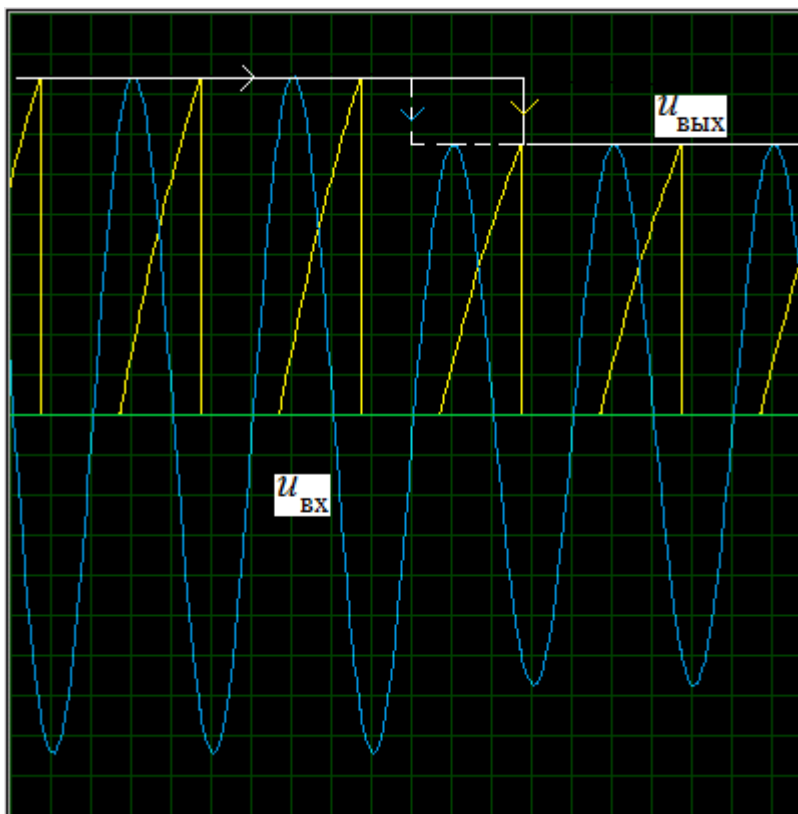


Рис.4.15 Осцилограма перехідного процесу при ступінчастій зміні вхідної трифазної напруги

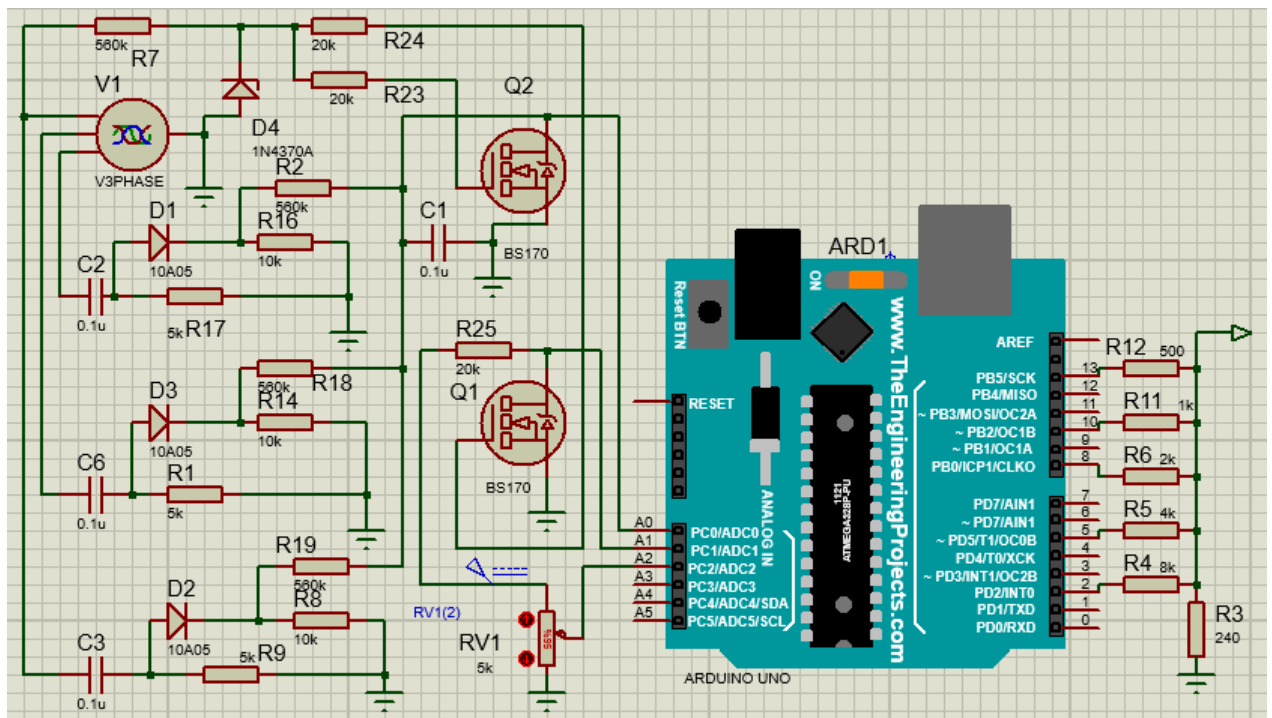


Рис.4.16 Схема регулятора трифазної напруги генератора

Випрямлення сигналів виконують діоди D2, D3, D1. Підсумовування сигналів від фаз та їх інтегрування відбувається на конденсаторі C1. Періодичний розряд конденсатора виконує польовий транзистор Q2, який синхронізується із фазою генератора транзистором Q1. Завдання на регулятор подається із потенціометра RV1.

На рис. 4. 16 наведено приклад п'ятирозрядного регулятора асинхронного генератора з ємнісним збудженням, цифрові виходи контролера використовуються для комутації п'яти секцій конденсаторів збудження.

Контролер Arduino UNO має десятирозрядний АЦП для аналогових вхідних сигналів, тому його точність не гірша за 0.1%, що в 10 разів перевищує точність аналогових випрямляючих датчиків і дозволяє стабілізувати напругу автономного генератора з високою точністю при швидкодії датчика 0.02с.

Програма для реалізації І-регулятора на базі схеми рис. 8 зайняла 12% оперативної пам'яті контролера.

Більш детальний опис реалізації цифрової системи стабілізації напруги асинхронного генератора розглянуто в розглянуто у п'ятому розділі роботи.

Висновки.

1. Аналіз властивостей аналогових датчиків трифазної напруги на базі діодних випрямлячів та вихідного ємнісного фільтра показав, що підвищення швидкодії датчика призводить до гіперболічного зростання пульсацій випрямленої напруги.

2. При часі реакції на ступінчасту зміну напруги менше одного періоду змінного струму величина пульсацій стає більше одного відсотка напруги, що вимірюється, що не дозволяє їх використовувати у високоточних системах стабілізації напруги.

3. Використання методу вимірювання напруги змінного струму шляхом його диференціювання, випрямлення з подальшим інтегруванням протягом половини періоду змінного струму дозволяє наприкінці періоду вимірювання отримати значення, пропорційне середньому значенні амплітуди напруги.

4. Точність вимірювання напруги у пропонованого датчика при використанні десятирозрядного АЦП складе 0.1% напруги, що вимірюється при швидкодії 0.02 с.

5. Реалізація пропонованого датчика в швидкодіючій системі стабілізації напруги автономних генераторів дозволяє використовувати найпростіший контролер та невелику оперативну пам'ять.

5. РЕАЛІЗАЦІЯ ДИСКРЕТНОГО ІНТЕГРАЛЬНОГО РЕГУЛЯТОРА НАПРУГИ АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА З КОНДЕНСАТОРНИМ ЗБУДЖЕННЯМ

5.1 Дискретний датчик трифазної напруги для регулювання напруги асинхронного генератора

У роботі розроблено та досліджено спосіб вимірювання середнього значення трифазної напруги інваріантної щодо частоти струму.

Виконання операцій диференціювання та випрямлення фазної напруги з подальшим підсумовуванням та інтегруванням дозволяє в кінці періоду вимірювання отримати значення середнього значення трифазної напруги, яке практично не залежить від частоти струму, [108].

При виборі способу реалізації датчика розглядалося два варіанти: (1) аналогове диференціювання та випрямлення фазних напруг та їх цифрове підсумовування; (2) аналогові диференціювання, випрямлення та інтегрування, рис. 5.1.

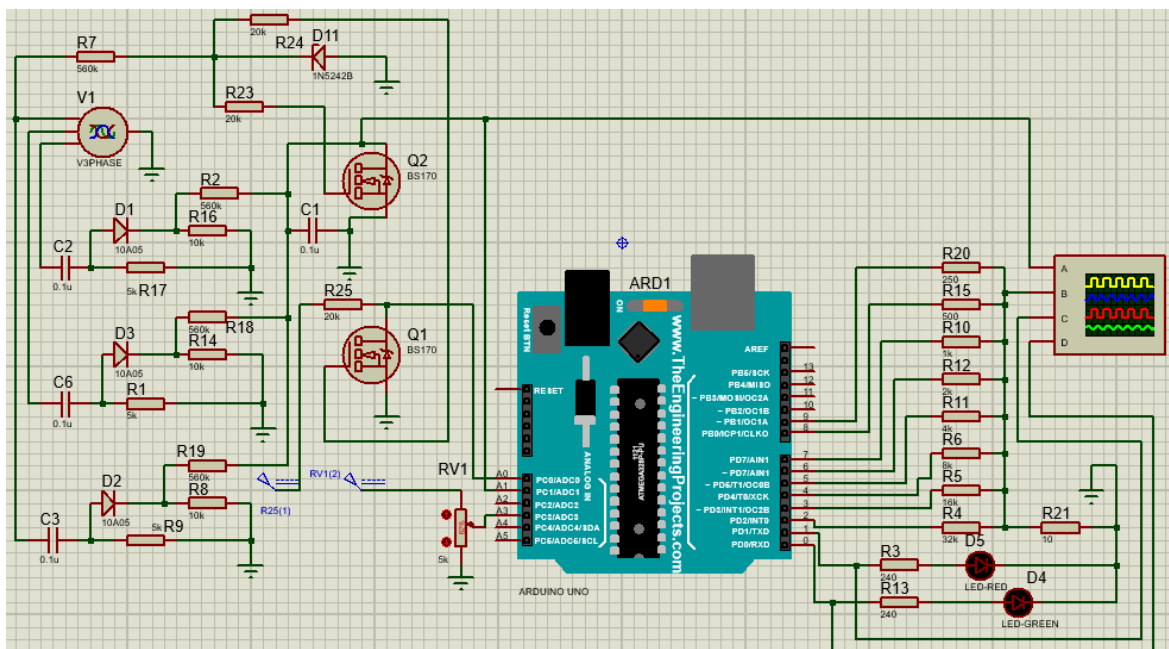


Рис.5.1 Реалізація вимірювання та регулювання трифазної напруги АГ на контролері ARDUINO UNO

Для завдання регулювання напруги, що генерується, другий спосіб підходить більше, т.я. пропонується простіший контролер для подальшої обробки сигналу. Цей же контролер використовується для формування дискретного закону керування конденсаторами, що комутуються.

Моделювання процесів у датчику та регуляторі виконано в середовищі Proteus 8 Professional з використанням програм FLProg-7.3.8. Програма мовою C++ наведена у розділі 5.3.

Генерація синусоїдальної трифазної напруги виконується генератором V1, див. 5.1. Вхідна напруга генератора V1 і вихідний пилкоподібний сигнал датчика середнього значення трифазної напруги, підключений до аналогового входу контролера A1 показаний на рис. 5.2.

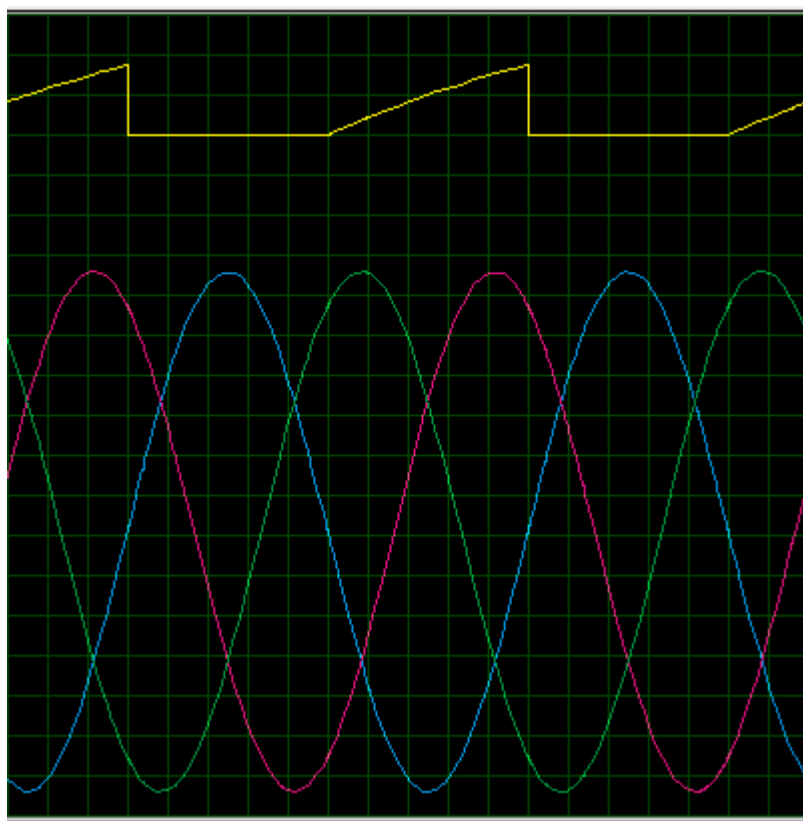


Рис.5.2 Вхідні синусоїдальні та вихідний пилкоподібний сигнали трифазного датчика напруги

Синхронізація роботи датчика з мережею генератора виконується від однієї фази за допомогою польового транзистора Q1 та ланцюжка R7-D11. Синхроімпульс подається на вхід контролера A0, рис. 5.3.

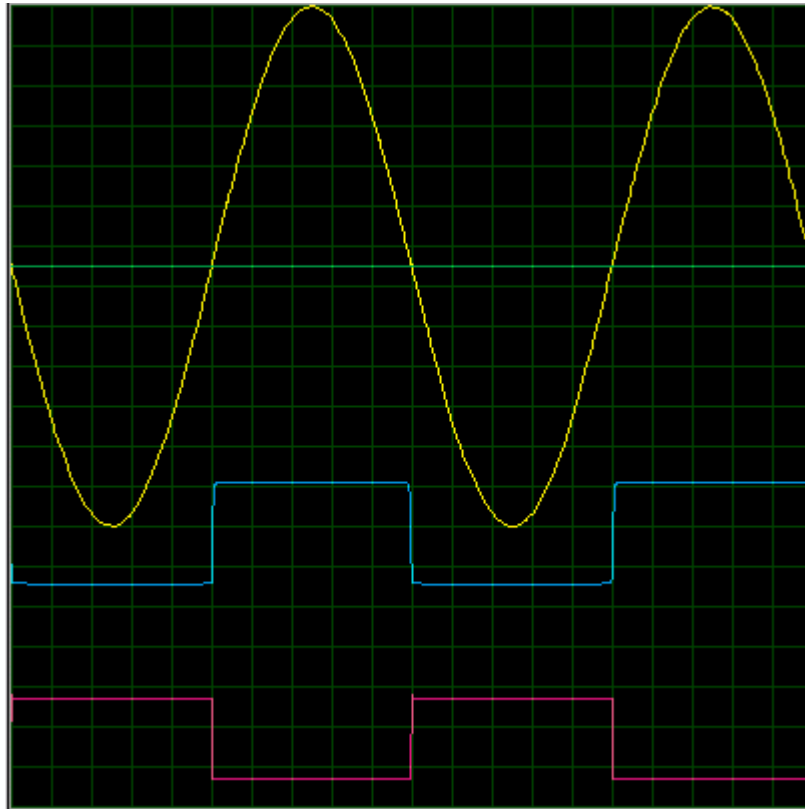


Рис.5.3 Формування синхроімпульса

Диференціювання вхідних сигналів виконують коли C2-R17, C6-R1, C3-R9. Випрямлення здійснюють діоди D1-D3.

Підсумовування та інтегрування реалізується на конденсаторі C1, який періодично шунтується польовим транзистором Q2 від синхроімпульсу, рис. 5.4.

Для більш точного інтегрування можна застосувати операційний підсилювач, що дещо ускладнює схему. У цьому випадку пилкоподібна вихідна напруга датчика стає практично лінійною, [108].

Вхідний аналоговий сигнал датчика контролером перетворюється на цифровий двійковий десятирозрядний код, з яких вісім використовується для формування закону управління комутованими конденсаторами асинхронного генератора.

Програмування контролера виконано за допомогою FLProg-7.3.8. Тут програмування супроводжується логічними та математичними блоками, рис. 5.5.

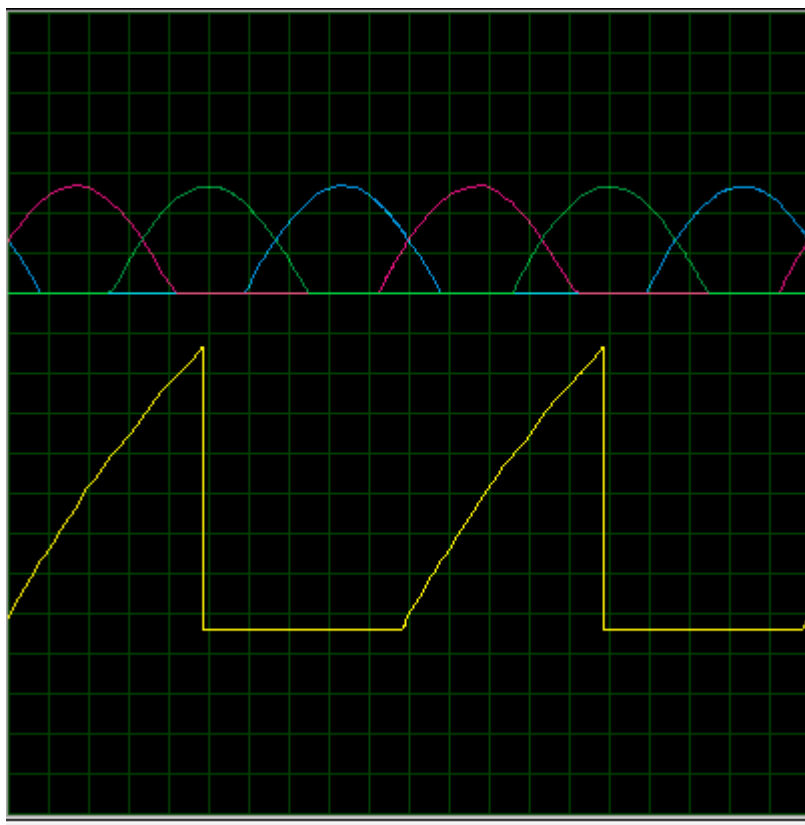


Рис.5.4 Продиференційовані та випрямлені фазні напруги та вихідний сигнал датчика трифазної напруги

Вхідний пилкоподібний сигнал НАП та синхроімпульс ГІ подаються на входи А1 та А0. Сигнал датчика перетворюється на АЦП і масштабується блоком І1/І2, що формує внутрішню змінну НАПР, показану на рис. 5.6.

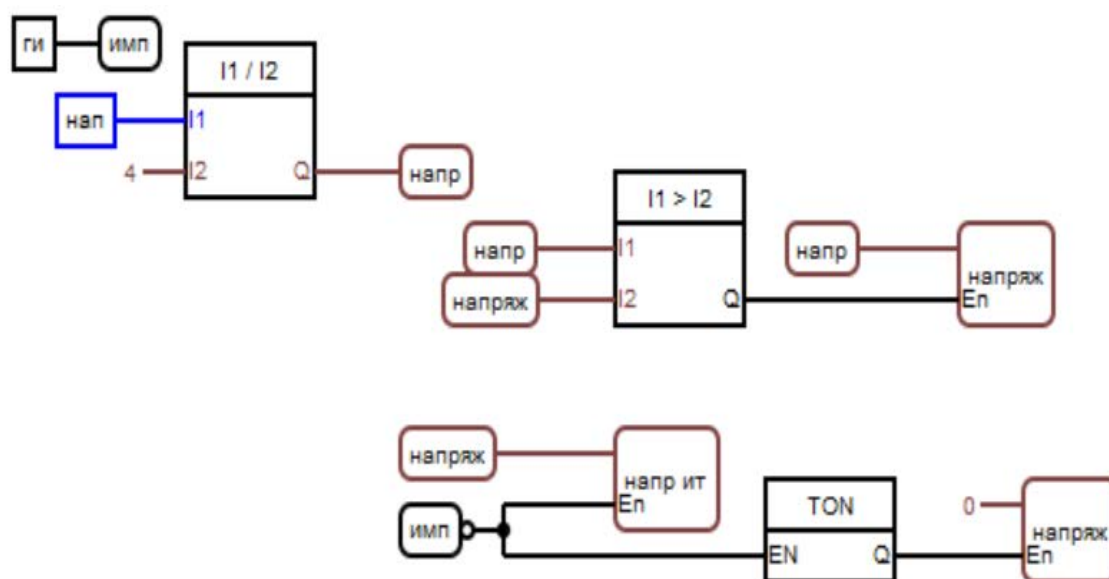


Рис.5.5 Логічна схема програми датчика напруги

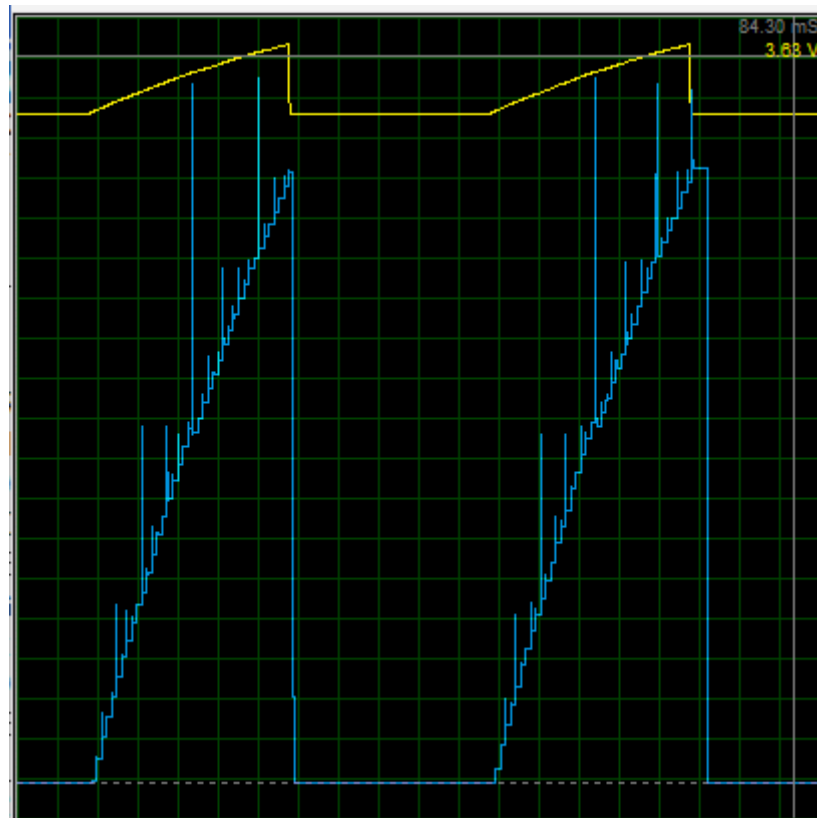


Рис.5.6 Аналоговий та цифровий сигнали датчика напруги

Далі за допомогою блоку $I1>I2$ запам'ятовується максимальне значення пілкоподібної напруги у вигляді змінної НАПРУЖ, яке далі зберігається і змінюється в кожен період синхроімпульсу у вигляді змінної НАПР ІТ за допомогою блоку затримки TON і скидання змінної НАПРУЖ, рис. 5.7.

На рис. 5.8 показаний процес зміни вихідної напруги датчика при зменшенні та при збільшенні вхідної трифазної напруги на 30%. Реакція датчика на зміну напруги не перевищує одного періоду напруги, що генерується.

Внутрішня змінна контролера НАПР ІТ надалі використовується для реалізації закону управління напругою асинхронного генератора.

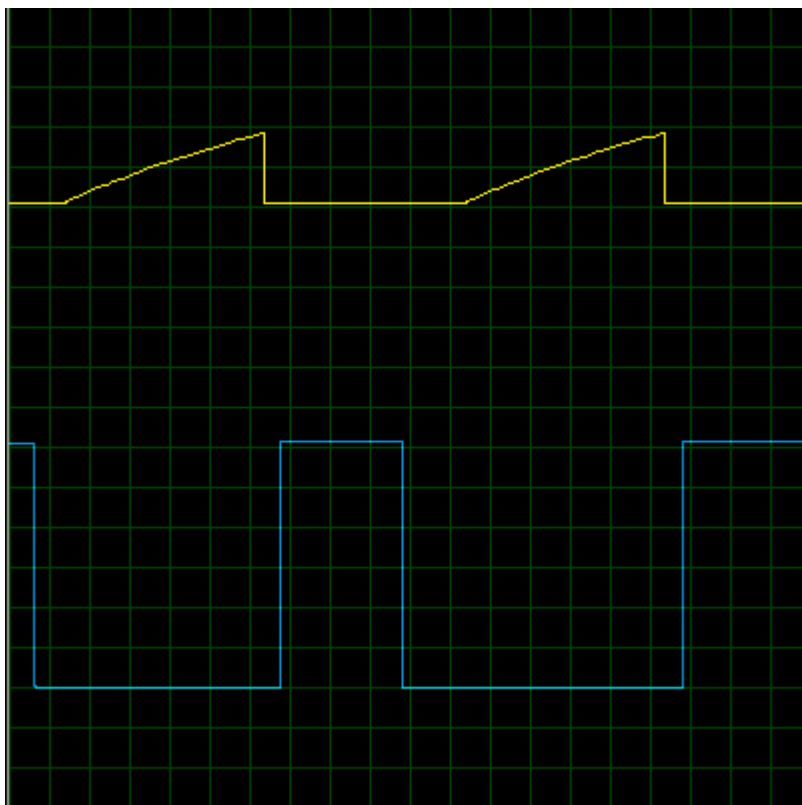


Рис.5.7 Вхідна та вихідна напруга цифрового датчика

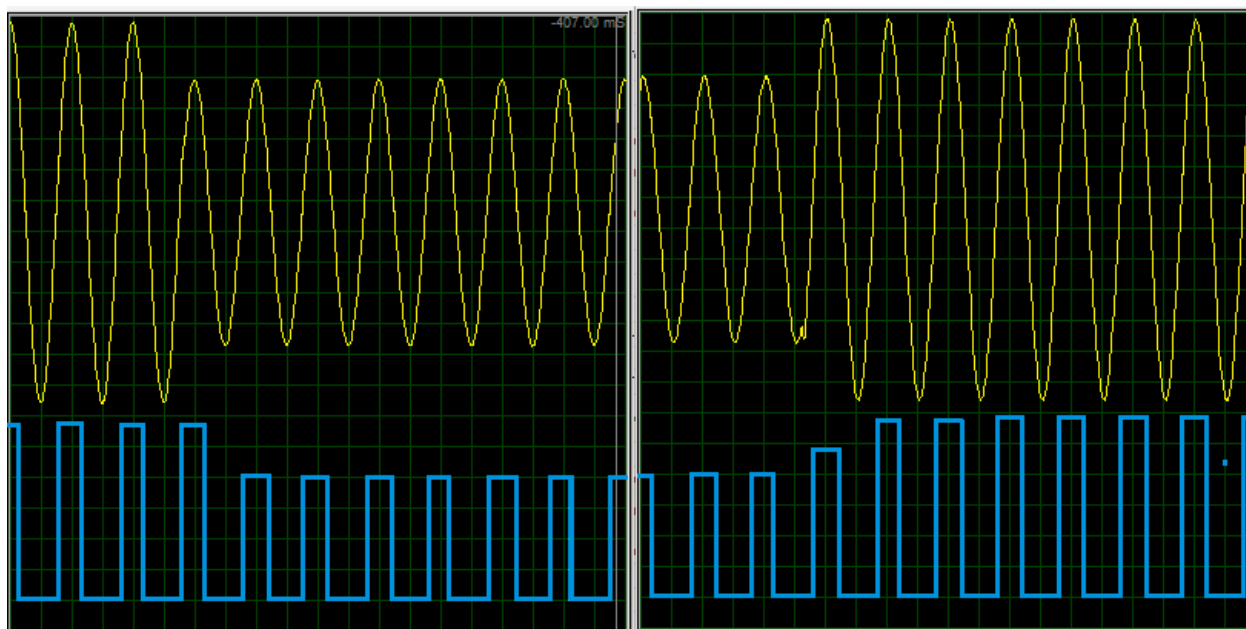


Рис.5.8 Процес зміни вихідної напруги датчика при зменшенні та при збільшенні вхідної трифазної напруги на 30%

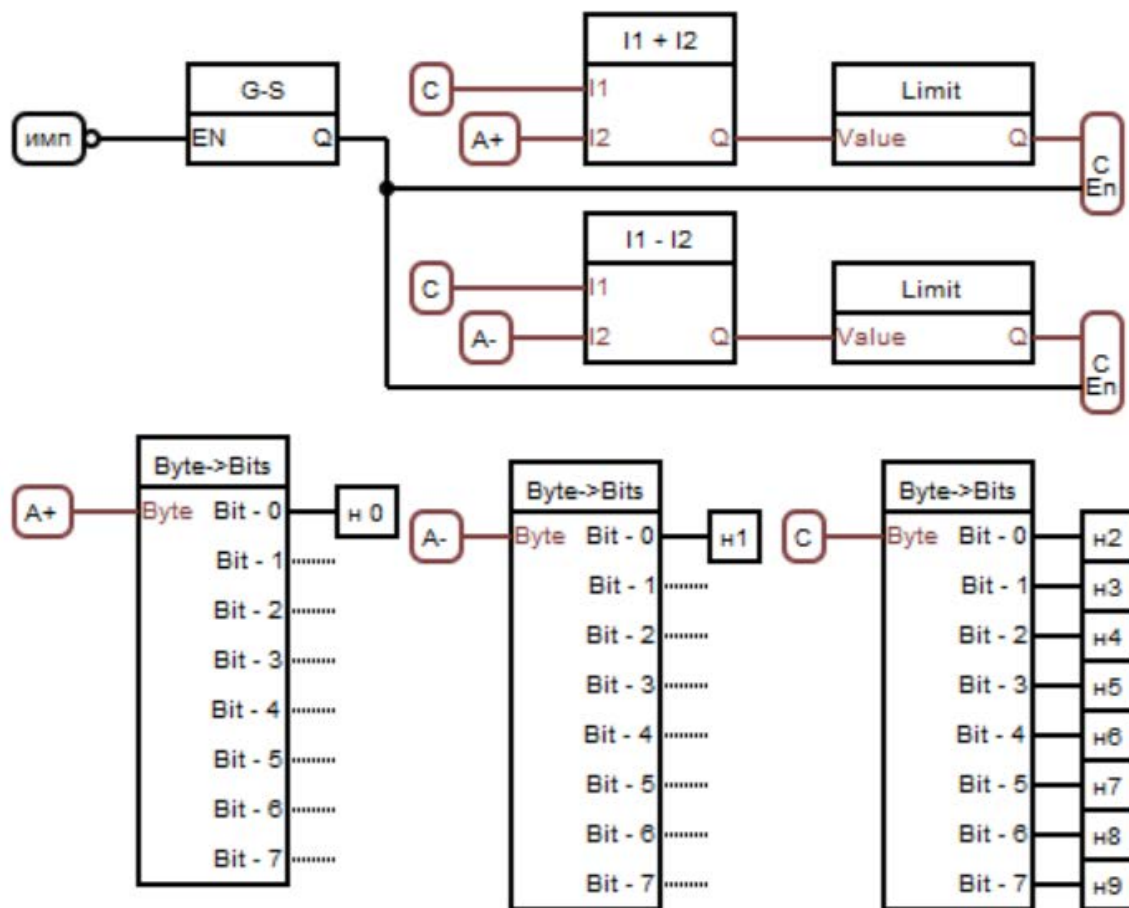


Рис.5.9 Логічна схема програми управління напругою АГ

Інформація про трифазну напругу генератора надходить у вигляді вторинної змінної НАПР ІТ з програми реалізації датчика напруги, наведеної на рис. 5.5.

Напруга, що задається, подається на аналоговий вхід контролера АЗ з потенціометра RV1, див. рис. 5.1. Сигнал ЗАВДАННЯ масштабується блоком I1/I2. Порівняння сигналів завдання та поточної напруги виконується блоком I1-I2, а потім масштабується блоком I1/I2 та обмежується блоком Limit.

На виході ланцюжка отримуємо значення відхилення. Якщо напруга генератора перебуває у стадії збудження, тобто низька, сигнал А обнуляється за допомогою блоку I1>=I2.

Наступна підпрограма вводить зону нечутливості для відхилення напруги А і поділяє сигнал відхилення на його знак. Якщо відхилення А позитивно, то $A+ = A$; $A- = 0$; якщо А негативно, то $A- = |A|$; $A+ = 0$. Це дозволяє уникнути додаткових кодів негативних значень двійкових чисел.

Після виконання вимірювання напруги та її відхилення від заданого значення протягом половини періоду, тобто. при позитивному синхроімпульсі ІМП із невеликою затримкою блоком G-S реалізується закон управління (5.1). Кількість розрядів керуючого числа обмежуємо блоками Limit.

Моделювання дискретного інтегрального регулятора показано на рис. 5.10 та рис. 5.11.

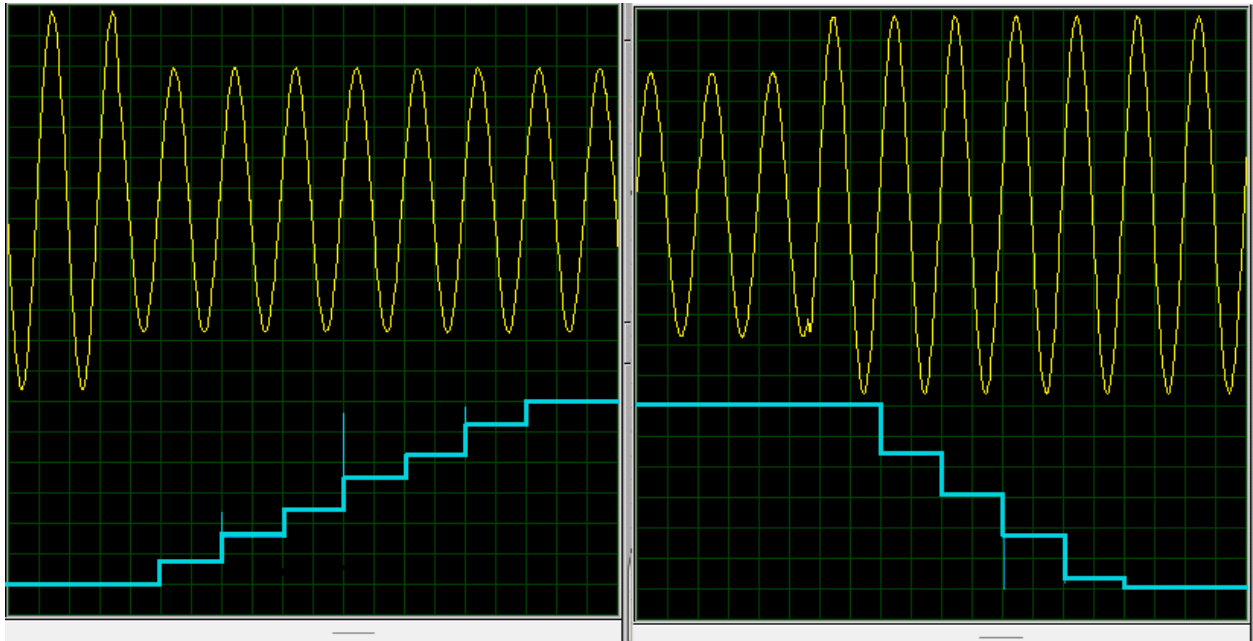


Рис 5.10 Вихідний сигнал регулятора при ступінчастій зміні напруги генератора

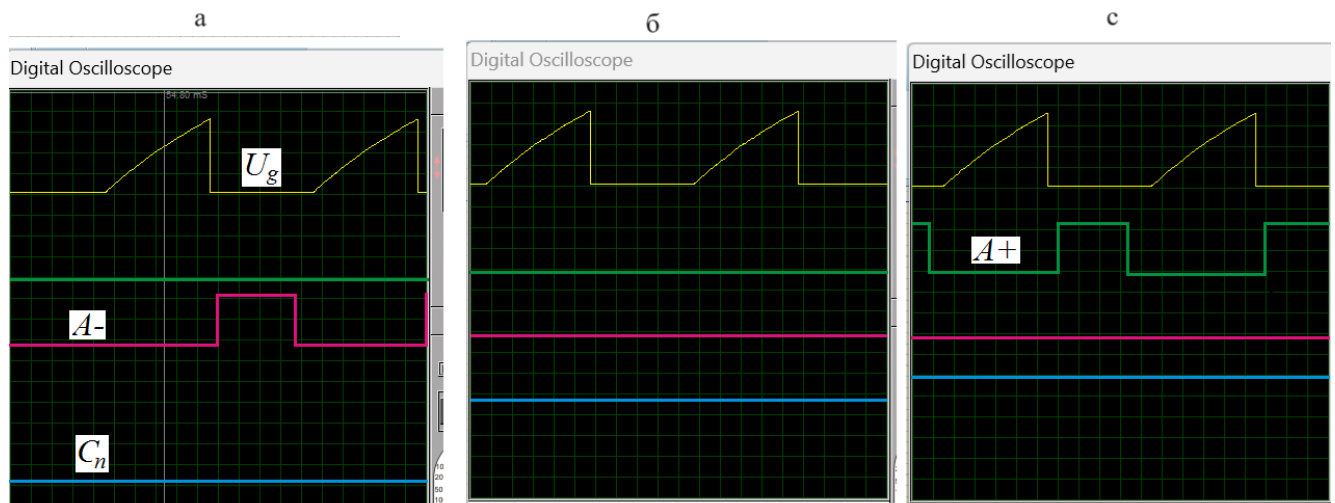


Рис.5.11 Вихідний сигнал п'ятирозрядного регулятора напруги:

а - при великій напрузі, $C_n = 0$; б - при напрузі в зоні нечутливості, $C_n = 25$;

с – при низькій напрузі, $C_n = 32$.

Управляючий сигнал C_n , що включає симістори конденсаторів, що комутують, перетворюється в паралельне двійкове число за допомогою блоку Byte-Bits. Для контролю сигналів керування C_n у схемі рис. 5.1 встановлено цифро-аналоговий перетворювач на резисторах. Сигнали та виводяться на світлодіоди.

5.3 Експериментальні дослідження на лабораторному стенді асинхронного генератора

З метою перевірки адекватності математичної моделі системи керування напругою асинхронного генератора з короткозамкнутим ротором та конденсаторним збудженням та комп'ютерної програми моделювання дисертантом під наглядом його керівника розроблений та виготовлений лабораторний стенд, який реалізує збудження та управління асинхронним генератором потужністю 3 кВт типу АО2-32-4 в режимі комутації активного навантаження та пуску асинхронних двигунів потужністю 0.18 та 0.55 кВт, рис. 5.12.

В якості приводу генератора використовується асинхронний двигун потужністю 3 кВт типу АО2-32-4 в спарці з генератором, який має живлення від стаціонарної електромережі. Також експериментальний стенд у складі має конденсатори збудження типу МБГЧ, блок симісторних ключів, контролер, вимірювальний комплекс з осциллографом та вимірювальними приладами, активне та моторне навантаження, прилади комутації.

В цьому стенді збудження експериментального асинхронного генератора забезпечується металопалієвими конденсаторами МБГЧ, габаритні показники яких втричі гірші, ніж у сучасних поліпропіленових конденсаторів.

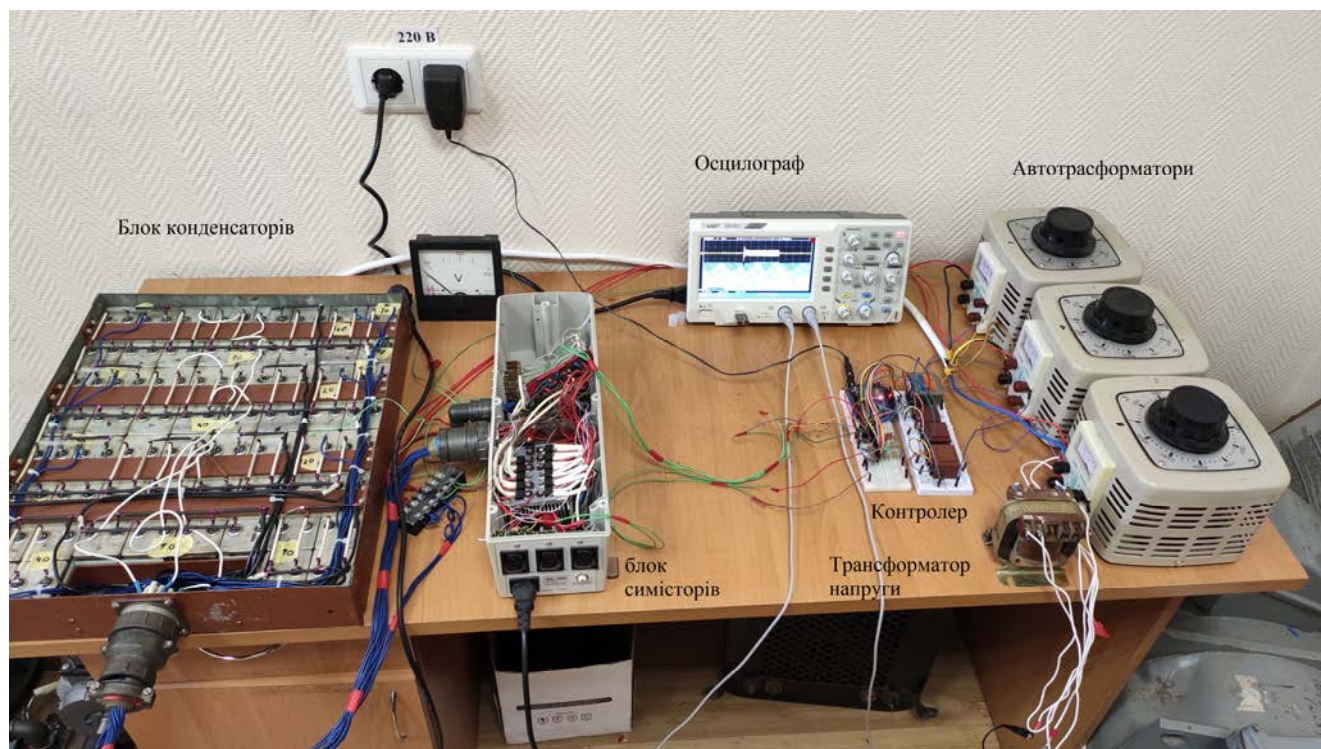


Рис.5.12 Лабораторний стенд асинхронного генератора з системою цифрового управління напругою

Контролер, який виконано на поширеній платі ARDUINO UNO та запрограмовано для реалізації чотирирозрядного регулятора з зоною нечутливості ± 20 В.

Схема лабораторному стенд асинхронного генератора з системою цифрового керування напругою наведена на рис. 5.13.

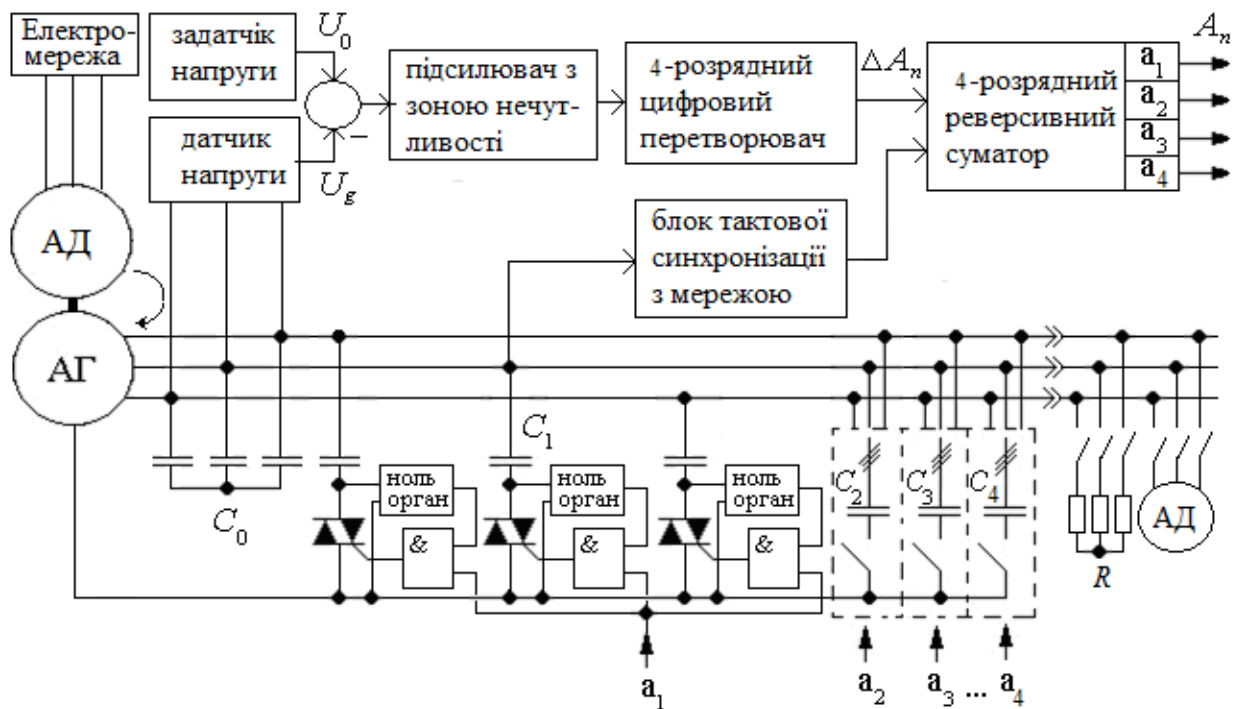


Рис.5.13 Схема лабораторного стенду асинхронного генератора

Початкове збудження генератора забезпечується від постійно підключеного блоку конденсаторів при обертанні генератора приводним двигуном. Величина ємності постійно підключеного блоку конденсаторів C_0 забезпечує задану напругу АГ на холостому ході при номінальній швидкості обертання приводного двигуна. При зміні навантаження або частоти обертання генератора регулювання напруги генератора забезпечується підключенням до обмоток статора генератора чотирьох додаткових блоків конденсаторів в різних поєднаннях.

Напруга від задатчика напруги U_0 порівнюється з напругою на виході датчика напруги генератора U_g . Їхня різниця посилюється з урахуванням «зони нечутливості», а потім перетворюється аналого-цифровим перетворювачем на 4-розрядне двійкове число ΔA_n , яке за допомогою блоку тактової синхронізації один раз за період напруги АГ складаються або віднімаються з керуючого числа A_{n-1} , що зберігається в реверсивному суматорі. Отже, один раз у період керуюче число A_n оновлюється.

Сигнали a_i з вихідного регістру суматора управляють комутацією тиристорних ключів, що підключають конденсатори C_i до статорних обмоток АГ. Для усунення перехідних струмів сигнал управління на відмикання ключа подається в момент рівності нулю напруги на ньому. Цей момент визначається за допомогою нуля органу тиристорного ключа, вихідний сигнал якого подається на один із входів елемента «І», на другий вхід якого подається керуючий сигнал a_i . У момент, коли $a_i = 1$ та напруга на ключі переходить через нуль, вихідний сигнал схеми «І» відмикає відповідний тиристорний ключ. В результаті ємність збудження змінюється раз в період доти, доки напруга U_g генератора не увійде в «зону нечутливості».

Перевірка адекватності моделі з 4-розрядною системою керування виконана при комутації 60 % активного навантаження. Запис осцилограми перехідного процесу наведено на рис. 5.15, а. Такий самий процес розрахований на математичній моделі з параметрами експериментального генераторного комплексу, рис. 5.15, б. «Зона нечутливості» на експериментальному стенді та у комп'ютерній моделі встановлені однакові - ± 7 % номінальної напруги.

Таблиця 5.1 Характеристика холостого ходу асинхронних машин

$C, \text{мкФ}$	$U_a, \text{В}$	$U_b, \text{В}$	$U_c, \text{В}$	$I_a, \text{А}$	$I_b, \text{А}$	$I_c, \text{А}$
генератор 1						
35	139	139	140	1.50	1.55	1.53
40	200	204	202	2.6	2.8	2.7
45	230	236	236	3.6	4.0	3.9
50	250	256	256	4.6	4.9	5.0
генератор 2						
40	228	232	232	2.9	3.3	3.4
45	250	256	258	3.7	4.2	4.5
50	266	270	272	4.6	5.0	5.3

В якості генератора експериментального стенду обрана перша асинхронна машина. Далі методом найменших квадратів відхилень від апроксимуючої кривої

Ланжевена $m_e E = \text{cth}(m_i I_\mu) - \frac{1}{m_i I_\mu}$ побудована усереднена крива

намагнічування експериментального генератора з коефіцієнтами $m_e = 0.75$ та $m_i = 7.23$, рис. 5.14.

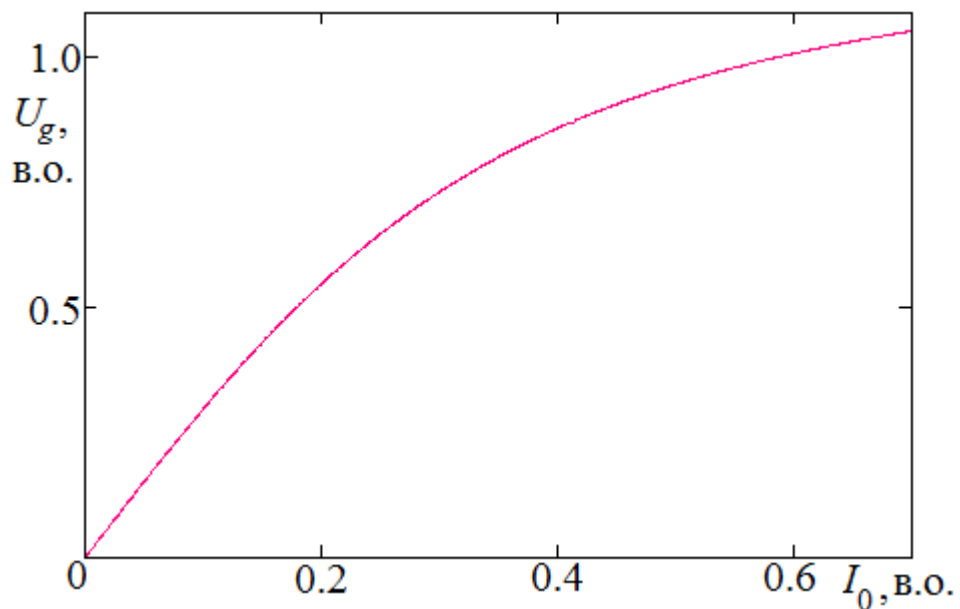


Рис.5.14 Апроксимація експериментальної кривої намагнічування АГ

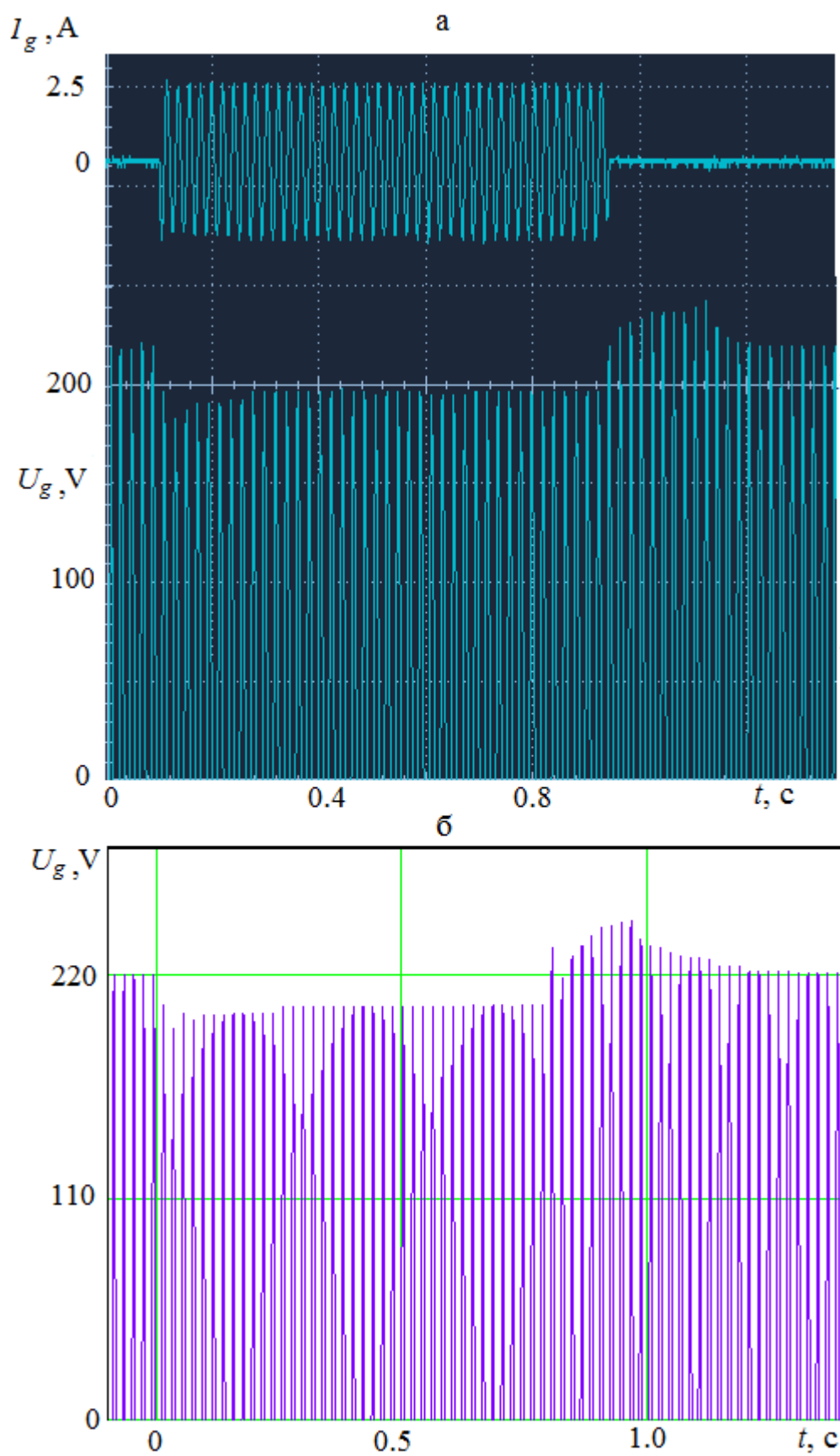


Рис.5.15 Перевірка адекватності моделі асинхронного генераторного комплексу з цифровим регулятором напруги

Функція Ланжевена, що наведена на рис. 5.14 та електричні параметри машини АО2-32-4 використані в комп'ютерній моделі асинхронного генераторного комплексу для порівняння перехідних процесів комутації навантаження, рис. 5.15.

Порівняння експериментального (рис. 5.15, а) та розрахункового (рис. 5.15, б) процесів встановлення напруги генератора с системою керування при комутації 60% активного навантаження, табл. 5.2 дозволяє оцінити точність математичної моделі та її адекватність.

Таблиця 5.2 Порівняння параметрів перехідних процесів при комутації навантаження

Динамічне відхилення при включенні навантаження	Експеримент	16 %	Різниця	4 %
	Моделювання	12 %		
Час перехідного процесу	Експеримент	0.24 с	Різниця	0.04 с
	Моделювання	0.20 с		
Динамічне відхилення при відключенні навантаження	Експеримент	23 %	Різниця	3 %
	Моделювання	20 %		
Час перехідного процесу	Експеримент	0.40 с	Різниця	0.10 с
	Моделювання	0.30 с		

На експериментальному стенді отримані наступні показники перехідного процесу: динамічне відхилення напругу при включенні навантаження складає 16% , а при відключенні — 23%. Час встановлення напруги 0.20 с та 0.30 с відповідно.

На комп'ютерній моделі процес комутації навантаження має наступні показники: динамічне відхилення напруги при включенні навантаження дорівнює 12% , а при відключенні — 20%. Час перехідних процесів - 0.24 с та 0.40 с відповідно.

Таким чином розбіжність показників динамічних відхилень становить 3 — 4 %, а тривалість встановлення напруги відрізняється на 0.1 с.

Форма та характер динамічних процесів подібні. С цього можливо зробити висновок про допустиму точність та адекватність математичної моделі асинхронного генераторного комплексу.

В цьому експерименті був задіяний цифровий 4-розрядний регулятор напруги, який комутує трифазні блоки конденсаторів, ємність яких співвідноситься як 1:2:4:8 та забезпечує 100% навантаження з коефіцієнтом потужності 0.8. Для підвищення точності стабілізації напруги в два рази треба додати ще один розряд регулятора.

Далі наведені типові перехідні процеси комутації 100% навантаження генератора та пуску асинхронних двигунів, рис. 5. 16 – 5.17.

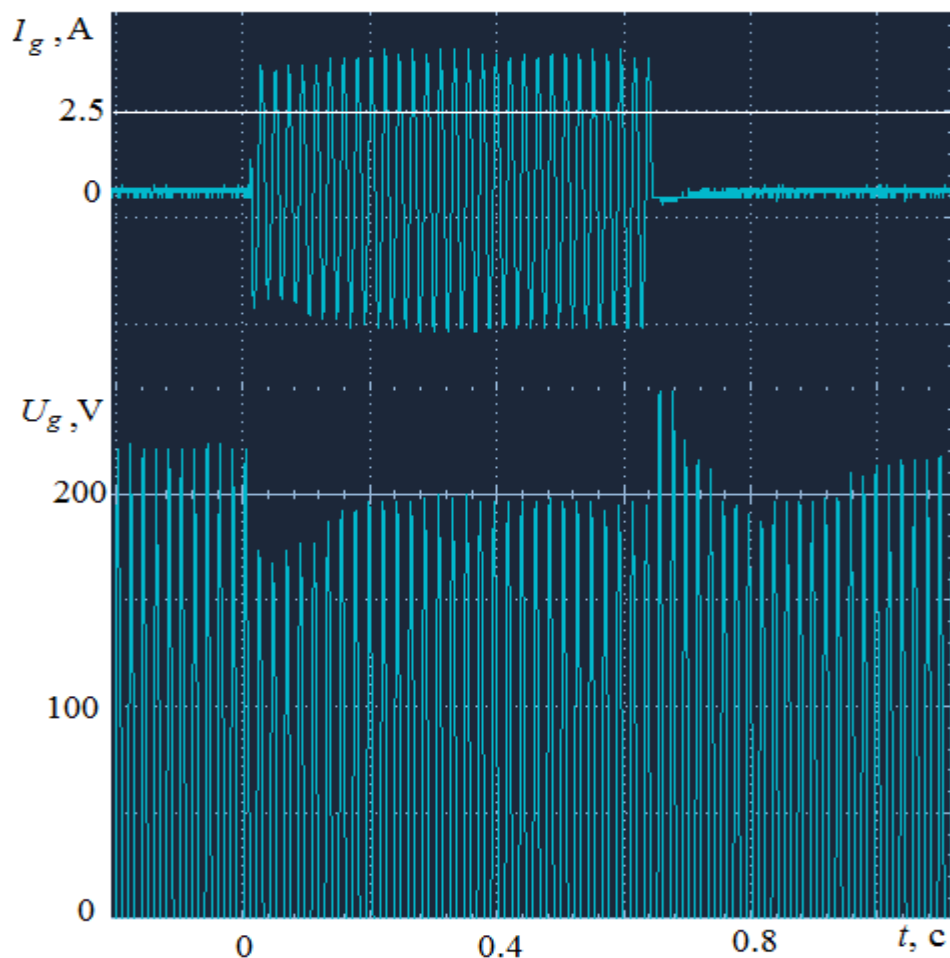


Рис.5.16 Процес комутації 100 % активного навантаження експериментального асинхронного генератора

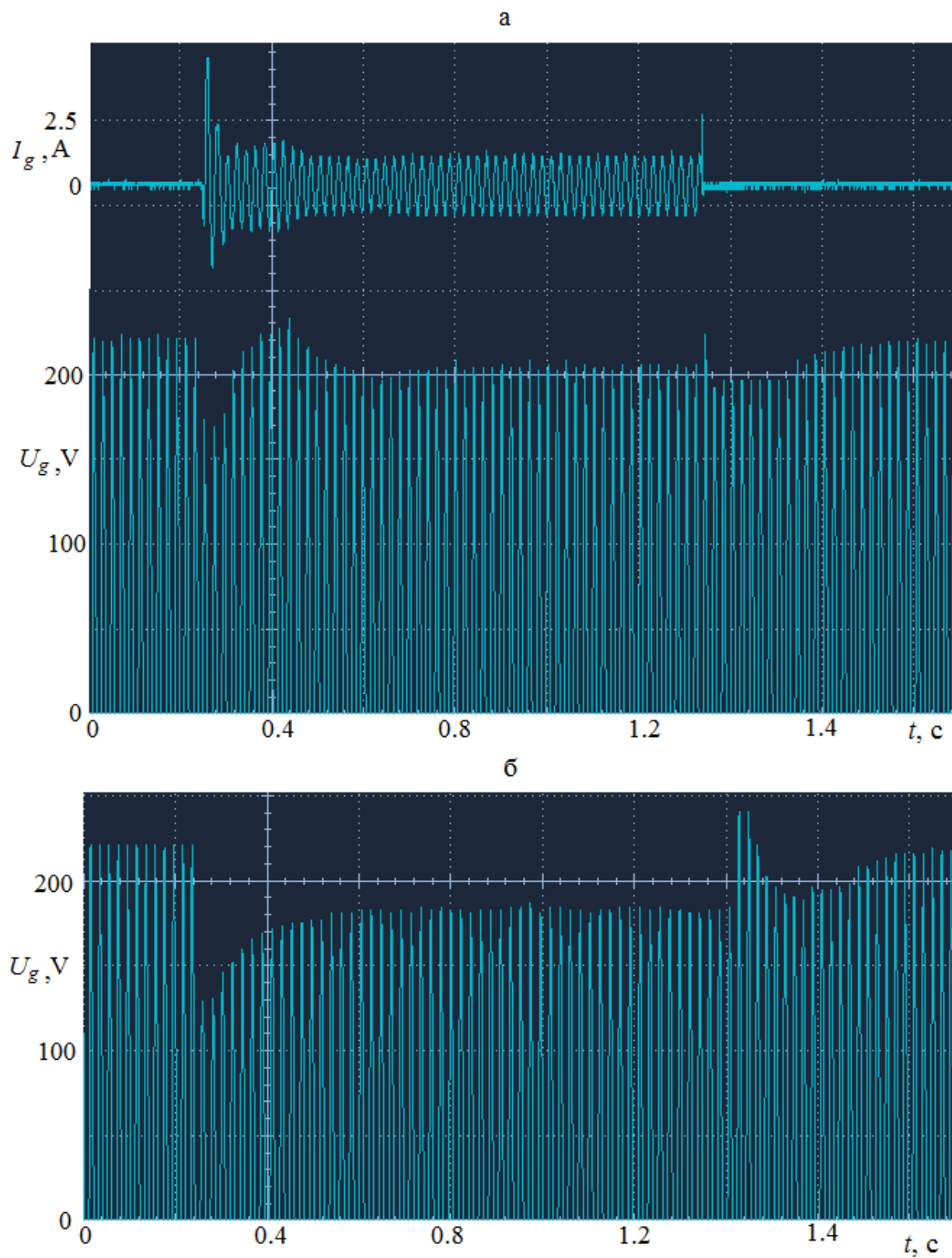


Рис.5.17 Процес пуску асинхронних двигунів потужністю 0.18 кВт (а) та 0.55 кВт (б) від асинхронного експериментального генератора

Висновки.

1. Експериментальні дослідження на лабораторному стенді дозволили порівняти розрахункові та фізичні перехідні процеси, які співпадають з точністю 4 % по динамічному відхиленню при включенні навантаження, та 0.1 с по часу перехідного процесу.

2. Розроблені технічні рішення по реалізації регулятора конденсаторного збудження дозволяють прискорити впровадження асинхронного генератора в судових та інших автономних енергетичних установках.

ВИСНОВКИ

1. Розроблено дискретно-імпульсний спосіб керування напругою асинхронного генератора, що забезпечує високу точність стабілізації напруги до $\pm 2.5 \%$ та швидкодією краще 0.1 с.
2. Запропонований та досліджений датчик трифазної напруги, інваріантний до частоти струму, який дозволяє виконувати точні вимірювання (краще 0.1 %) середнього значення напруги за півперіод струму.
3. Удосконалено та доповнено математичну модель суднової установки з асинхронним генератором, яка містить 27 диференціальних рівнянь та враховує процеси комутації кожного конденсатора напівпровідниковим ключем, що дозволяє детально досліджувати перехідні процеси та оптимізувати закони стабілізації напруги.
4. Дослідження законів керування напругою асинхронного генератора за відхиленням: інтегральний, диференційний, пропорційний та з форсуванням збудження; за збуренням та комбінований по навантаженню — показало, що найкращим за швидкодією та простотою реалізації є інтегральний закон керування напругою.
5. Експериментальні дослідження на лабораторному стенді дозволили порівняти розрахункові та фізичні перехідні процеси, які співпадають з точністю 4 % по динамічному відхиленні при включенні навантаження, та 0.1 с за тривалістю перехідного процесу.
6. Розроблені технічні рішення по реалізації регулятора конденсаторного збудження дозволяють прискорити впровадження асинхронного генератора в суднових та інших автономних енергетичних установках.
7. Проведені дослідження показали, що впровадження розробленої системи дозволяє знизити час перехідних процесів до 0.05...0.1 с при комутації навантаження генератора, що покращує експлуатаційні характеристики СЕЕС.
8. Запропонована система керування асинхронним генератором підвищує надійність роботи суднових електроенергетичних систем в умовах нестабільного

навантаження та зміни режимів роботи.

9. Впровадження асинхронних генераторів призводить до зменшення витрат на обслуговування, що підвищує економічну ефективність експлуатації автономних електроенергетичних систем.

10. Необхідно подальше вдосконалення системи керування напруги для роботи в умовах значних коливань навантаження та пуску електродвигунів співвимірної потужності.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Dhikra Chermiti, Adel Khedher A New Method Voltage and Frequency Regulation of Self-Excited Induction Generator Operating in Stand Alone // WSEAS Transactions on environment and development, 2014.– Volume 10.– pp. 150-159.
2. Bilal Abdullah Nasir An accurate dynamical model of induction generator utilized in wind energy systems // Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science Vol. 27, No. 3, September 2022.– pp. 1185-1198.
3. Lalit Goyal, Om Prakash Mahela, Sunil Goya A survey of self-excited induction generator research // International Journal of Electrical and Electronics Engineering (IJEEE), 2013.– Vol. 2.– Issue 1.– pp. 31-40.
4. Yogesh K. Chauhan, Sanjay K. Jain, Bhim Singh A Prospective on Voltage Regulation of Self-Excited Induction Generators for Industry Applications // IEEE transactions on industry applications, 2010.– vol. 46.– No. 2. – pp. 720-730.
5. Ezzeddine Touti, Habib Kraim, Remus Pusca, Raphael Romary Modeling of anisolated induction generator considering saturatione effect // Archives of electrical engineering, 2018.– vol. 67(4) .– pp.755-772.
6. M. L. Elhafyani, S. Zouggar, M. Benkaddour, Y. Zidani Permanent and Dynamic Behaviours of Self-excited Induction Generator In balanced mode // M.J. condensed mater, January 2006.– Vol. 7.–No 1. – pp. 49-53.
7. R. Wamkeue, Rouyn-Noranda, L. Songiaand M. Lakehal, Switzerland P. State Modelling of Self-excited Induction Generator for Wind Power Applications // Wind Energy, 2006.– No 9.– Published online 14 June 2006 in Wiley Interscience. – pp. 499-520.
8. Mohamed Arbi Khlifi, Badr M. Alshammari Steady State Analysis of an Isolated Self-Excited Dual Three-Phase Induction Generator for Renewable Energy // International Journal of Modern Nonlinear Theory and Application, 2014.– № 3. – pp. 191-198.

9. A.C. Joshi, Dr. M.S. Chavan Induction Generator: Excitation & Voltage Regulation // International Journal of Innovative Research in Electrical, Electronics, Instrumentation and Control Engineering, 2017.– Vol. 5.– Issue 5. – pp. 219-223.

10. E.S. Obe, G.D. Umoh, L.U Anih Load Loss Performance Of An Autonomous Self-Excited Induction Generator // Nigerian Journal of Technology, June 2011.–Vol. 30. – N 2. – pp. 40-48.

11. Levy E. An experimental investigation of self-excitation in capacitor excited induction generators / E. Levy, Y. W. Liao // Elect. Power Syst. Res., 2000. –vol. 53.– pp. 59-65.

12. A. Nesba, R. Ibtouen, S. Mekhtoub, O. Touhami, N. Takorabet Rectified Self-Excited Induction Generator as Regulated DC Power Supply for Hybrid Renewable Energy Systems // WSEAS Trans. on Circuits and Systems, 2005.–Issue 11.–Vol. 4.–November.– pp. 1457-1463.

13. Aissa Kheldoun Larbi, Djalal Eddine Refoufi Khodja, Analysis of the self-excited induction generator steady state performance using a new efficient algorithm // Electric Power Systems Research, 2012. –N 86. – pp. 61- 67.

14. D. K. Palwalia, S. P. Singh, “DSP based induction generator controller for single phase self excited induction generator,” International Journal of Emerging Electric Power Systems, , 2008.–Vol. 9.–Issue 1, Article 2.– pp. 157-163.

15. Пас А.Є. Дослідження динаміки асинхронного самозбуджувального генератора поблизу стану / А.Є. Пас, Л.В. Вишневський // Изв. ВНЗ Електромеханіка, 1980. –№ 6. – С.591-596. (російською мовою)

16. Марков В.С. Огляд та аналіз сучасних гіпотез самозбудження автономних асинхронних генераторів // Інтегровані технології та енергозбереження, 2017. – №1. – С. 73-94.

17. Клепиков В.Б. Дослідження процесів самозбудження в електромеханічній системі «детандер – асинхронний генератор– інвертор » / В.Б.Клепиков, В.І. Колотіло, О.М. Моїсєєв, Є.Ф. Банєв // Електроінформ, 2007. – №2. – С. 6–8.

18. Rahim Y. H. A. Excitation of isolated three-phase induction generator

by a single capacitor // Proc. Inst. Elect. Eng., Elect. Power Appl., 1993.– vol.140.– No.1.– pp. 44-50.

19. Murthy S. S. Experiences with the analysis, design and control of induction generators operating in autonomous or grid connected mode // Proc. Conf. Evolution Modern Aspects Induction Machines, Turin, Italy, 1986.– pp. 400–407.

20. Krause P.C. Simulation of symmetrical induction machinery / P.C.Krause, C.H.Thomas // IEEE Trans. Power App. Syst., Nov. 1965.– vol. PAS-84.– No. 11.– pp.–1038–1053.

21. Novotony D. W. Self-excitation in inverter driven induction machines / D. W. Novotony, D. J. Gritter, G. H. Studtmann // IEEE Trans. Power App. Syst., Apr. 1977.– vol. PAS-96.– No. 4. –pp. 1117–1125.

22. Veda R. Investigation of self-excitation conditions in self-excited type induction generator / R. Veda, T. Sonoda, K. Goga // Proc. IEEE Ind. Appl. Soc. Annual Conf. Rec., Oct. 1986.– pp. 889–895.

23. Ліщенко О.І. Математична модель та алгоритм розрахунку режимів асинхронного стартер-генератора з транзисторним перетворювачем / О.І.Ліщенко, В.О. Лісник, Л.І. Мазуренко // Технічна електродинаміка, 1989.– № 5.– С. 55-61. (російською мовою)

24. Мішин В.І. Компенсований асинхронний генератор для автономних систем електропостачання / В.І. Мішин, В.В. Козирський, В.В. Каплун, А.М.Кулініч, С.С. Макаревич // Електротехніка та електромеханіка, 2007.– № 2.– С.42-47. (російською мовою)

25. Ліщенко О.І. Диференціальні рівняння та розрахунок перехідних процесів асинхронного генератора з урахуванням насичення / О.І. Ліщенко, В.О.Лісник, О.П. Фаренюк // Технічна електродинаміка.– № 1.– С. 56-65. (російською мовою)

26. Ліщенко О.І. Математична модель автономної електроустановки з асинхронним генератором та регульованою системою збудження / О.І. Ліщенко, В.О. Лісник, О.П. Фаренюк // Технічна електродинаміка, 1989. – №6. – С.81-88. (російською мовою)

27. Мішин В.І., В.В., Каплун, С.С. Автономний асинхронний генератор із внутрішнім ємнісним збудженням / В.І. Мішин, В.В. Каплун, С.С.Макаревич // Електротехніка, 2011. - № 3. - С. 20-25. (російською мовою)
28. Ліщенко О.І. Асинхронні машини з масивним феромагнітним ротором / О.І. Ліщенко, В.О. Лісник // Київ: Наук. думка, 1984. – 168 с. (російською мовою)
29. Вишневський Л.В. Моделювання генераторів змінного струму з різними типами роторів / Л.В. Вишневський, О.М. Веретенник // Електромашиноб. та електрообладнання. – К.: Техніка, 2001. – Вип.57. – С.50-54. (російською мовою)
30. Вишневський Л.В. Постійні часу асинхронного генератора із конденсаторним збудженням / Л.В. Вишневський, М.Й. Муха // Електромашинобудування та електроустаткування.– К.: Техніка, 1999.– Вип.53. – С.21-26. (російською мовою)
31. Васько П.Ф. Електромеханічна стала часу вітроелектричних установок з асинхронними генераторами в навантажувальних режимах роботи / П.Ф. Васько, П.П. Пекур // Відновлювана енергетика, 2006. – № 2. – С. 70-76.
32. Пас А.Є. Розрахунок коефіцієнтів передачі асинхронного самозбуджувального генератора / А.Є. Пас, Л.В. Вишневський // Електромашинобудування та електрообладнання. – К.: Техніка, 1981. – Вип.33. – С.84-89. (російською мовою)
33. Головка В.М. Імітаційна модель для аналізу параметрів автономних вітроелектричних установок з асинхронним генератором / Головка В.М., Коханевич В.П. та інш. // Альтернативна енергетика та екологія. – 2017. – №4. – С. 42-52. (російською мовою)
34. Swati D. Desing of Excitation Capacitance for Self-Excited Induction Generator / D. Swati, S.V. Jayaram. // International journal of computer science and communication network, 2011.– Vol.1.– № 3.– pp. 264-269.
35. Dandan Ma. Self-excited Induction Generator – A Study Based on Nonlinear Dynamic Methods // A thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy.-School of EEE at Newcastle University, United Kingdom, May, 2012. –P.151.
36. Godoy Simoes M. Modeling and Analysis with Induction Generators / M.

Simoes Godoy, Felix A. Farret. – NY.: CRC Press, 2015. – P. 435.

37. Ліщенко О.І. Асинхронні машини з масивним феромагнітним ротором / О.І. Ліщенко, В.О. Лісник–Київ: Наук. думка, 1984. –168 с. (російською мовою)

38. Mohamed E. A.б Farrag , Ghanim A. Putrus Analysis of the Dynamic Performance of Self-Excited Induction Generators Employed in Renewable Energy Generation // Energies, 2014.– № 7.– pp. 278-294.

39. Touti E. Modeling of an isolated induction generator considering saturation effect/ E. Touti, H. Kraim, R. Pusca, R. Romary // Archives of electrical engineering, 2018.– Vol.67(4).– pp. 755-772.

40. Електричні машини і апарати: навчальний посібник / Ю.М.Куценко, В.Ф. Яковлев та ін. – К.: Аграрна освіта, 2013. – 449 с.

41. Електричні машини і трансформатори: навч. посібник / М.О. Осташевський, О.Ю. Юр'єва; за ред. д-ра техн. наук, професора В.І. Мілих.– Київ: Каравела, 2018.– 452 с.

42. Мишин В.И. Асинхронный электромеханический комплекс в автономной системе / В.И. Мишин, В.В., Каплун, С.С Макаревич // Електротехніка і Електромеханіка, 2008.– №1.– С. 30-35. (російською мовою)

43. Загірняк М.В. Електроприводи з енергопостачанням від автономних асинхронних генераторів / М.В. Загірняк, Ю.В. Зачепа, Д.І. Родькін, О.П.Чорний, В.В. Ченчової: монографія. - Кременчук: ПП Щербатих А. В., 2018. - 199 с. (російською мовою)

44. Мельник В.П. Математичні моделі і методи аналізу режимів енергосистем / В.П. Мельник. – Івано-Франківськ: НАІР, 2017. – 488 с.

45. M. L. Elhafyani Permanent and Dynamic Behaviours of Self-excited Induction Generator In balanced mode / M. L. Elhafyani, S. Zouggar, Y. Zidani, M. Benkaddour // M. J. Condensed Mater, 2006. –Vol. 7. – No 1. – pp. 49-53.

46. Лісник В.Я. Вплив параметрів асинхронної машини та схемних рішень системи збудження на характеристики автономного асинхронного генератора із змішаним навантаженням / В.Я. Лісник, Ю.В. Шуруб // Електрифікація і автоматизація сільського господарства. – Київ, 2006.– №2. – С. 67-79.

47. Бочаров М.К. Особливості сучасних конденсаторних установок середньої напруги / М.К. Бочаров, Ю.П. Зубюк // Вибухозахищене електрообладнання: сб.науч.тр. УкрНДІВЕ.- Донецьк: ТОВ «АІР», 2011.– С. 181-192. (російською мовою)

48. Бояр-Созонович С.П. Расчет варикондного звена в цепи возбуждения самовозбуждающегося асинхронного генератора / С.П. Бояр-Созонович, В.В.Волошин // Энергетика.– 1982.– № 2.– С.31-36. (російською мовою)

49. Муха М. Динамічна компенсація реактивної потужності у суднових автономних електроенергетичних системах: Дис. докт. техн. наук.: Національний університет «Львівська політехніка». Львів, 2018. – 404 с.

50. Вишневський Л.В. Системи управління асинхронними генераторними комплексами / Л.В. Вишневський, А.Є. Пас.– Київ-Одеса: Либідь, 1990.–168 с. (російською мовою)

51. Родькін Д.І. Характеристики та режими асинхронного генератора при глибокому насиченні сталі / Д.І. Родькін, В.В. Ченчовий // Електротехнічні та комп'ютерні системи, 2014.– № 15 (91) .– С. 271-276. (російською мовою)

52. German – Galkin S. Tests of the Ship's Cage Induction Generator with the DC Electrical Network / S. German – Galkin, D. Tarnapowicz // 19th International Conference on Mechatronics - Mechatronika (ME) . – Prague, Czech Republic, 2020. – pp. 1-5.

53. Вишневський Л.В. Теорія, методи розрахунку систем управління та робочі режими суднових електроустановок з асинхронними генераторами // Дис. докт. техн. наук.– Санкт-Петербург, 1991.– 400 с. (російською мовою)

54. Yan Langtao Modeling of Marine Asynchronous Shaft Generator and Simulation of Subsynchronization State / Yan Langtao, Tan Jiawan, Liu Yusheng, Yang Hui // Langtao. – Mathematical Problems in Engineering.–Wiley Online Library, 2020.–11 P.

55. Зачепа Ю.В. Автономні системи електропостачання на базі асинхронних генераторів, основні вимоги та структура // Електромеханічні та енергозберігаючі системи, 2010.–Вип. 2.– С. 32-40. (російською мовою)

56. Зачепа Ю.В. Аналіз систем компенсації реактивної потужності в умовах автономних генераторних установок / Ю.В. Зачепа, Т.С. Василькова // Електромеханічні і енергозберігаючі системи, 2010.– Випуск 4/(12).– С.71–77. (російською мовою)

57. Juan Dixon A Full Compensating System for General Loads, Based on a Combination of Thyristor Binary Compensator, and a PWM-IGBT Active Power Filter / Juan Dixon, Yamille del Valle, Marcos Orchard, Micah Ortúzar, Luis Morán, Carlos Maffrand // IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, 2003.– Vol.50.– No.5.– pp. 1-8.

58. Yogesh K. Chauhan A Prospective on Voltage Regulation of Self-Excited Induction Generators for Industry Applications / Yogesh K. Chauhan, Sanjay K. Jain, Bhim Singh // IEEE transactions on industry applications, March/April 2010.–Vol. 46. –No. 2.– pp.720-730.

59. Joshi1 A.C. Induction Generator: Excitation & Voltage Regulation/ A.C. Joshi1, M.S. Chavan // International Journal of Innovative Research in Electrical, Electronics, Instrumentation and Control Engineering, May 2017.– Vol. 5.– Issue 5.– pp. 219-223.

60. Печеник М.В. Регулювання напруги асинхронного генератора із самозбудженням за допомогою електронного регулятора навантаження / М.В.Печеник, В.С. Бовкунович, М.В. Пушкар // Електромеханічні і енергозберігаючі системи, 2015. – Кременчук: КрНУ.– Вип. 3. – с. 8287. (російською мовою)

61. Бояр-Созонович С.П. Автономний асинхронний генератор із цифровим регулятором напруги / С.П. Бояр-Созонович, Л.В Вишневський. // Изв. АН СРСР Энергетика та транспорт, 1988.– № 5.– С.156-161. (російською мовою)

62. Вишневський Л.В. Комп'ютерна оптимізація цифрового регулятора напруги суднової електроустановки / Л.В. Вишневський, О.М. Веретенник, М.Й. Муха // Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. - Одеса: ОГМА, 2003. - № 8. - С. 79-85. (російською мовою)

63. Вишневський Л.В. Критерії оптимальності налаштувань цифрових

регуляторів збудження генераторних електроустановок / Л.В. Вишневський, О.М.Веретенник, М.Й. Муха // Електромашинобудування та електрообладнання.— К.:Техніка, 2002.— Вип.59.— С. 50-55.(російською мовою)

64. Bansal R. C Three-Phase Self-Excited Induction Generators: An Overview // IEEE transactions on energy conversion, June 2005.—Vol.20.—No. 2.— pp. 292–299.

65. Красношапка М.М. Генератори змінного струму стабільної та регульованої частоти.— Київ: Техніка, 1974.—168 с. (російською мовою)

66. Моделювання процесу самозбудження в електромеханічній системі «Турбодетандер-Асинхронний генератор-інвертор» / В. Б. Клепіков, В.І.Колотіло, О. М. Мойсєєв, Є. Ф. Баньов // Вестн. Нац. техн. ун-ту Харк. політехн. ін-та.—Х.: НТУ "ХПІ", 2007.—Вип. 1.— С. 37-39. (російською мовою)

67. Беляєв В.М. Робочі режими суднових допоміжних енергетичних установок із асинхронними дизель-генераторами: Дис. канд. техн. наук.— Одеса, 1999.— 148 с. (російською мовою)

68. Муха М.Й. Компенсація реактивної енергії в судновій електроенергетичній системі під час пусків асинхронних двигунів / М.Й. Муха, С.С. Павленко, С.А.Дудко. // Електромеханічні та енергозберігаючі системи: тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія й практика» – Кременчук: КрНУ, 2012. – Вип. №3 / (19) .– С.283-287. (російською мовою)

69. Муха М.Й. Динамічні властивості системи стабілізації напруги у режимі пуску асинхронного двигуна від судової електростанції / М.Й. Муха, С.С. Павленко // Електротехнічні та комп'ютерні системи. Електротехнічні комплекси та системи. Науково-технічний журнал. Київ «Техніка», 2013.— Вип. 09(85) .– С. 50-56. (російською мовою)

70. Муха М.Й. Дискретне керування конденсаторним компенсатором реактивної потужності у пускових режимах потужних асинхронних двигунів / М.Й. Муха, С.С. Павленко // Вісник Національного технічного університету «ХПІ», Збірник наукових праць, Серія: Проблеми автоматизованого електроприводу, Теорія та практика, Харків: НТУ «ХПІ», 2013. - № 36 (1009) .– С.

412-416. (російською мовою)

71. Мироненко В.П. Стійкість паралельної роботи асинхронних дизель-генераторів: Дис. канд. техн. наук.– Одеса, 1987. (російською мовою)

72. Торопцев Н.Д. Методи аналізу режимів самозбуджувальних асинхронних генераторів, що працюють на загальну мережу // Праці КІПА. Питання авіаційної електротехніки.–Київ,1969.–Вип.111.–С.19-29.(російською мовою)

73. Вишневський Л.В. Узгодження управління автономною електроенергетичною системою з компенсацією реактивної потужності / Л.В.Вишневський, О.П.Тумольський // Електротехнічні та комп'ютерні системи, 2015. –№19(95). – С.150-153. (російською мовою)

74. Веретенник О.М. Моделювання процесів стабілізації напруги синхронного генератора у режимі компенсації реактивної потужності // Електромашинобуд. та електрообладнання. – К.: Техніка, 2003. – Вип. 61.– С. 29-32. (російською мовою)

75. Bhatti T. S. Reactive power control of isolated hybrid power systems/ T. S. Bhatti, R. C. Bansal, D. P. Kothari. // in Proc. Int. Conf. Computer Application Electrical Engineering Recent Advances, Roorkee, India, Feb.21–23, 2002. –pp.626–632.

76. Голюков С.П. Суднові автоматизовані електроенергетичні системи. Ч.1. Суднові електростанції / С.П. Голюков, С.Г.Чорний, Д.О. Жук, М.В.Івановський. – Керч, вид-во Кондор. – 2013. – 198 с.

77. Вишневський Л.В. Універсальна математична модель генератора змінного струму / Л.В. Вишневський, В.П Мироненко. // Изв. ВНЗ Електромеханіка, 1986. - № 3. - С. 33-40. (російською мовою)

78. Електричні машини. Навчальний посібник / Г.Г. Півняк, Ф.П.Шкрабець, В.П. Довгань.– Дніпропетровськ, Видавництво Національного гірничого університету, 2003. – 329 с.

79. О.Г. Плахтина Математичне моделювання автономного джерела на базі асинхронного генератора з самозбудженням і тиристорного регулятора напруги /

О.Г. Плахтина, А.С. Куцик, Б.Л. Копчак // Lviv Polytechnic National University Institutional Repository, 2001. – pp. 140-146.

80. Nallen R.L. How induction generators work // Electrical Apparatus, 1980. – v.33. –N 7.– P.52-57.

81. Теорія та методи розрахунку асинхронних турбогенераторів / За ред. І.М.Постнікова. – Київ: Наук. думка, 1977. –176 с. (російською мовою)

82. Регістр судноплавства України. Правила класифікації та побудови морських суден.– Том 4.– Київ, 2020.– 632 с.

83. Регістр судноплавства України. Правила класифікації та побудови морських суден.– Том 3.– Київ, 2020.– 560 с.

84. Синхронні генератори 1FC. Brushless Constant-Voltage Synchronous Alternators 1FC. – Low-Voltage for shipboard and industrial use. - 40 с.

85. Синхронні генератори MJB. Data Sheets Three-phase Synchronous Generators.– 160 - 630 Frame sizes industrial application.– 348 с.

86. Синхронні генератори Sincro SK. - <http://www.sincro.com.au>.

87. Асинхронні генератори G11R – G22R. Three-phase Asynchronous Generators.–VEM motors GmbH.– 17 с.

88. Вишневський Л.В. Аналіз якості дискретних законів керування напругою генераторних установок // Електромашинобудування та електроустаткування. - К.: Техніка, 2000.– Вип. 55. – С. 46-52. (російською мовою)

89. Вишневський Л.В. Розрахунок напруги в електроустановках з імпульсними регуляторами / Л.В. Вишневський, М.Й. Муха, О.М. Веретенник // Автоматизація суднових технічних засобів. – Одеса: ОГМА, 2003. – Вип. 8. – С. 8-15. (російською мовою)

90. Вишневський Л.В. Комп'ютерне моделювання суднових допоміжних електроустановок / Л.В. Вишневський, О.М. Веретенник, М.Й. Муха // Суднові енергетичні установки. - Одеса: ОДМА.– 2001.– № 6.– С.23-30. (російською мовою)

91. Веретенник О.М. Підвищення ефективності експлуатації суднової установки стабілізацією потоку електричної енергії: Дис. докт. техн. наук. – Одеса, 2013. – 321 с. (російською мовою)

92. ISO 8528-1:2005. Агрегаты генераторные переменного тока с приводом от поршневых двигателей внутреннего сгорания.

93. Дао Мінъ Куан. Удосконалення режимів роботи асинхронного суднового дизель-генератора: дис. канд. техн. наук: 05.05.03. – Одеса, 2011. – 153 с. (російською мовою)

94. Патент №87294 С2, UA, H02P9/00, «Спосіб і пристрій для керування асинхронним генератором з конденсаторним збудженням» / Родькін Д.Й., Ріков Г.Ю., Шокар'єв Д.А., Скрипко О.А., Опубл. у Бюл.№ 13, 10.07.2009.

95. Патент № 2373630, RU, H02P9/46, «Пристрій для регулювання та стабілізації напруги автономного асинхронного генератора» / Богатир'єв Н.І., Баракін Н.С., Вронський А.В., Григораш А.О., Потєшин М.І., Степура Ю.П. 20.11.2009. (російською мовою)

96. Патент №113039 С2, UA, H02P9/46, «Спосіб керування напругою асинхронного генератора» / Вишневський Л.В., Вишневський Д.Л., Опубл. у Бюл. № 22, 25.11.2016.

97. Зачепа Ю.В. Асинхронний електропривод з живленням від автономного асинхронного генератора співставної потужності. Дис. канд. техн. наук. – Кременчук, 2013. – 247 с. (російською мовою)

98. Вишневський Л.В. Управління напругою автономних асинхронних генераторних установок / Л.В. Вишневський, М.Й. Муха, Дао Мінъ Куан // Монографія - Одеса: НУ «ОМА». – 2016. – 196 с. (російською мовою)

99. Vyshnevskyi L. Voltage Sensor of the Autonomous Generating Set / L.Vyshnevskyi, M. Mukha, O. Vyshnevskyi, D. Vyshnevskyi // In: 2020 IEEE 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), 2020. – pp. 712–715.

100. Mustafa G. Modular multilevel converters for balancing and filtering mains voltage in the vicinity of AC traction substation / G. Mustafa, S. Gusev, A Ershov, I. Luganskay // Vesnik NTU «KhPI», 2015. – Vol. 12 (1121). – pp. 495-500.

101. Вишневський Л. Перехідні процеси в системах стабілізації імпульсної напруги суднових дизель-генераторів / Л. Вишневський, М. Муха, О. Веретенник // Автоматизація суднових технічних засобів. – Одеса: ОДМА, 2002. – Вип. 7. – С.13-18. (російською мовою)

102. ISO 8528-3:2005 Reciprocating internal combustion engine driven alternating current generating sets—Part 3:Alternating current generators for generating sets.– 15 p.

103. ISO 8528-1:2018 Reciprocating internal combustion engine driven alternating current generating sets—Part 1: Application, ratings and performance.– 18 p.

104. _ISO 3046-4:2009 Reciprocating internal combustion engines – Performance – Part 4: Speed governing. – 17 p.

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

106. Вишневський Л.В. Оптимальне керування напругою асинхронного генератора/Л.В. Вишневський, І.А. Новосад // Автоматизація суднових технічних засобів: наук.-техн. зб., 1993. – Вип. 1. – Одеса: ОДМА. – С.19-28. (російською мовою)

107. Волович Г.І. Схемотехніка аналогових та аналого-цифрових електронних пристроїв. -М.: Видавничий дім Додека-XXI, 2005. – 528 с. (російською мовою)

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

ДОДАТОК А - Програма моделювання асинхронного генераторного комплексу

```

Program AG_3F5R;
  { Y[1] - Psa; Y[2] - Psb; Y[3] - Pra; Y[4] - Prb; Y[5] - Ua;
    Y[6] - Ub; Y[7] - W2 }
label 1,2,3;
const N=27;Rs=0.03;Rr=0.018;Ls=0.073;Lr=0.11;Lmo=3.3;Ucm=1;
  Uzad=1.0;
  Wb=314.159; Jm= 400;
type Mass = array [1..N] of Real;
var K0,K2,K3,K4,W,Y,F,Rm : Mass;
  Ft,FUm,FUdat,FUa,Fia,Fic1,FW2,Fic2,Fic3,FCn,Fic4,Fic5,FAn : Text;
  Ia,Ib,Ira,Irb,Im,Um,MaxR,T,Tok,Tcx,Tkp,DT,Ln,Lv,Gn,Gv,Rn,Rv,
  Tp,T2,I1,I2,I3,U1,U2,U3,C11,C21,C31,C12,C22,C32,C13,C23,C33,C14,C24,C34,C15,C25,C35,
  Ic11,Ic21,Ic31,Ic12,Ic22,Ic32, Ic13,Ic23,Ic33,Ic14,Ic24,Ic34,Ic15,Ic25,Ic35,
  Ic11s,Ic21s,Ic31s,Ic12s,Ic22s,Ic32s,Ic13s,Ic23s,Ic33s,Ic14s,Ic24s,Ic34s,Ic15s,Ic25s,Ic35s,
  Rk11,Rk21,Rk31,Rk12,Rk22,Rk32,Rk13,Rk23,Rk33,Rk14,Rk24,Rk34,Rk15,Rk25,Rk35,
  Ro1,Ro2,Ro3,Ro4,Ro5,Rz,Rk1,Rk2,Rk3,Rk4,Rk5,C1,C2,C3,C4,C5,Ic10,Ic20,Ic30,
  C10,C20,C30,C0,Dud,Du,Uz,Di,Ti,Td,Ud,
  Lm,Mg,T1,Tgr,Udat,Int,Ust,Df,De,Dfst,
  Tw,Tw1,W1,E1,IntD,Fi,W0,Dn,Tf,Kf,Ua,Ub : Real;
  J,Nu,Mpp,A,Nf,An,Cn,Ast,Cst : Integer;
procedure ASG (X:Real;var P,Z:Mass);
const Mi=12;
var Zn:Real;
function Lang (A:Real) : Real;
const Mp=0.9;
var B,D : Real;
begin
  B:=Exp(A);D:=Exp(-A);
  Lang:=(B+D)/(B-D)-1/A/Mp
end;
begin
  Zn:=(Ls+Lr)*Lm+Ls*Lr;
  Ia:=((Lm+Lr)*P[1]-Lm*P[3])/Zn; Ira:=((Lm+Ls)*P[3]-Lm*P[1])/Zn;
  Ib:=((Lm+Lr)*P[2]-Lm*P[4])/Zn; Irb:=((Lm+Ls)*P[4]-Lm*P[2])/Zn;
  Im:=Sqrt(Sqr(Ia+Ira)+Sqr(Ib+Irb)); Lm:=Lang(Mi*Im)/Im;
  Mg:=P[2]*Ia-P[1]*Ib;
  Tp:=T-T2; Fi:= Wb*P[5]*Tp;if Fi>6.28318 then T2:=T;
  I1:=Ia;I2:=Ia*cos(-2.09439)-Ib*sin(-2.09439);
  I3:=Ia*cos(2.09439)-Ib*sin(2.09439);
  U1:=P[25];U2:=P[26];U3:=P[27];{P[5]=1}
  Ic11:=(U1-P[7])/Rk11;Ic21:=(U2-P[8])/Rk21;Ic31:=(U3-P[9])/Rk31;
  Ic12:=(U1-P[10])/Rk12;Ic22:=(U2-P[11])/Rk22;Ic32:=(U3-P[12])/Rk32;
  Ic13:=(U1-P[13])/Rk13;Ic23:=(U2-P[14])/Rk23;Ic33:=(U3-P[15])/Rk33;
  Ic14:=(U1-P[16])/Rk14;Ic24:=(U2-P[17])/Rk24;Ic34:=(U3-P[18])/Rk34;
  Ic15:=(U1-P[19])/Rk15;Ic25:=(U2-P[20])/Rk25;Ic35:=(U3-P[21])/Rk35;
  Ic10:=I1-U1*Gn-P[22]-Ic11-Ic12-Ic13-Ic14-Ic15;
  Ic20:=I2-U2*Gn-P[23]-Ic21-Ic22-Ic23-Ic24-Ic25;
  Ic30:=I3-U3*Gn-P[24]-Ic31-Ic32-Ic33-Ic34-Ic35;
  Ua:=2*(U1+U2*cos(-2.09439)+U3*cos(+2.09439))/3;
  Ub:=-2*(U2*sin(-2.09439)+U3*sin(2.09439))/3;
  Z[1]:=-Ua-Ia*Rs; Z[2]:=-Ub-Ib*Rs;
  Z[3]:=-P[5]*P[4]-Ira*Rr;Z[4]:=P[5]*P[3]-Irb*Rr;
  Z[5]:=(P[6]-Mg*0.1)/Jm;Z[6]:=(-P[6]+Kf*Df)/Tf;
  Z[7]:= Ic11/C11; Z[8]:=Ic21/C21;Z[9]:=Ic31/C31;
  Z[10]:=Ic12/C12; Z[11]:=Ic22/C22;Z[12]:=Ic32/C32;
  Z[13]:=Ic13/C13; Z[14]:=Ic23/C23;Z[15]:=Ic33/C33;
  Z[16]:=Ic14/C14; Z[17]:=Ic24/C24;Z[18]:=Ic34/C34;
  Z[19]:=Ic15/C15; Z[20]:=Ic25/C25;Z[21]:=Ic35/C35;

```

```

Z[22]:=(U1-Rn*P[22])/Ln; Z[23]:=(U2-Rn*P[23])/Ln;
Z[24]:=(U3-Rn*P[24])/Ln;
Z[25]:=Ic10/C10; Z[26]:=Ic20/C20; Z[27]:=Ic30/C30;
end; {ASG}
begin
Assign(Ft, 'c:\Dat\t.prn'); Assign(FUm, 'c:\Dat\Um.prn');
Assign(FUdat, 'c:\Dat\Udat.prn'); Assign(FUa, 'c:\Dat\Ua.prn');
Assign(Fla, 'c:\Dat\Ia.prn'); Assign(Flc1, 'c:\Dat\Ic11.prn');
Assign(Flc2, 'c:\Dat\Ic12.prn'); Assign(FW2, 'c:\Dat\W2.prn');
Assign(FAn, 'c:\Dat\An.prn'); Assign(Flc3, 'c:\Dat\Ic13.prn');
Assign(Flc4, 'c:\Dat\Ic14.prn'); Assign(Flc5, 'c:\Dat\Ic15.prn');
Assign(FCn, 'c:\Dat\Cn.prn');
Rewrite(Ft); Rewrite(FUm); Rewrite(FUdat); Rewrite(FUa);
Rewrite(Fla); Rewrite(Flc1); Rewrite(Flc2); Rewrite(FW2);
Rewrite(FAn); Rewrite(Flc3); Rewrite(FCn); Rewrite(Flc4);
Rewrite(Flc5);
{ ** Calculate of start dates ** }
Ast:=0; Cst:=0; Cn:=0; Tcx:=10; Tkp:=2; Uz:=0.01; Du:=0.01;
Ln:=14.0; Lv:=2.3; Rn:=0.2; Rv:=0.1; Gn:=0.1; Gv:=0.6;
W0:=1.0; Kf:=50; Tf:=20; Dn:=0.00; Di:=0; Td:=100; Ti:=200;
Rk11:=1000; Rk21:=1000; Rk31:=1000; Rk12:=1000; Rk22:=1000; Rk32:=1000;
Rk13:=1000; Rk23:=1000; Rk33:=1000; Rk14:=1000; Rk24:=1000; Rk34:=1000;
Rk15:=1000; Rk25:=1000; Rk35:=1000;
Ro1:=1.6; Ro2:=0.8; Ro3:=0.4; Ro4:=0.2; Ro5:=0.1;
Rz:=1000; Rk1:=Rz; Rk2:=Rz; Rk3:=Rz; Rk4:=Rz; Rk5:=Rz;
C0:=0.7; C10:=C0; C20:=C0; C30:=C0;
C1:=0.035; C11:=C1; C21:=C1; C31:=C1;
C2:=0.07; C12:=C2; C22:=C2; C32:=C2;
C3:=0.14; C13:=C3; C23:=C3; C33:=C3;
C4:=0.28; C14:=C4; C24:=C4; C34:=C4;
C5:=0.56; C15:=C5; C25:=C5; C35:=C5;
Y[1]:=1+Ls*Cn; Y[2]:=-Ls/Rn; Lm:=Lmo; U1:=0.1; U2:=-0.1; U3:=-0.1;
Y[3]:=1+Lr*(1/Lm-Cn); Y[4]:=-Lr/Rn;
Y[5]:=1; Y[11]:=0.1; Y[12]:=0.1; Y[15]:=0.1;
Y[6]:=0.1; Y[7]:=0.1; Y[8]:=0.1; Y[9]:=0.1; Y[10]:=0.1; Y[13]:=0.1; Y[14]:=0.1;
Y[16]:=0.1; Y[17]:=0.1; Y[18]:=0.1; Y[19]:=0.1; Y[20]:=0.1; Y[21]:=0.1;
Y[22]:=0.1; Y[23]:=0.1; Y[24]:=0.1; Y[25]:=0.1; Y[26]:=0.1; Y[27]:=0.1;
T:=0; Mpp:=0;
Tok:=Tcx; W:=Y; T1:=0; A:=0; Tgr:=0; Ua:=0; Ub:=-1; Nu:=1;
Int:=0; Udat:=0; Nu:=1; Ust:=1;
W1:=1; Tw:=1; DT:=0.0001; E1:=0.0001; IntD:=0; Dfst:=0;

```

3: While T<Tok do

```

begin
Um:=Sqrt(Ua*Ua+Ub*Ub);
Tw:=Tw+DT;
{ ** Regulator W ** }
De:=W0-Y[5];
if De<(Dfst+Dn) then begin if De>(Dfst-Dn) then Df:=Dfst
else Df:=De+Dn end
else Df:=De-Dn;
Dfst:=Df;
{ ** Regulator U ** }
if (Ust*Ua<0) and (Ua<0) then
begin
Udat:=Int/Nu; Dud:=1-Udat; if Abs(Ud-Udat)-0.001>0 then Td:=T;
Ud:=Udat;
if (Dud>0) and (Dud<Uz) then An:=0; if (Dud>Uz) and (Dud<Uz+Du) then An:=1;
if (Dud>Uz+Du) and (Dud<Uz+2*Du) then An:=2; if (Dud>Uz+2*Du) and (Dud<Uz+3*Du) then An:=3;
if (Dud>Uz+3*Du) and (Dud<Uz+4*Du) then An:=4; if (Dud>Uz+4*Du) and (Dud<Uz+5*Du) then An:=5;
if (Dud>Uz+5*Du) and (Dud<Uz+6*Du) then An:=6; if (Dud>Uz+6*Du) and (Dud<Uz+7*Du) then An:=7;
if (Dud>Uz+7*Du) and (Dud<Uz+8*Du) then An:=8; if (Dud>Uz+8*Du) and (Dud<Uz+9*Du) then An:=9;

```



```

if(Dud>Uz+9*Du) and(Dud<Uz+10*Du)then An:=10;if(Dud>Uz+10*Du)and(Dud<Uz+11*Du)then An:=11;
if(Dud>Uz+11*Du)and(Dud<Uz+12*Du)then An:=12;if(Dud>Uz+12*Du)and(Dud<Uz+13*Du)then An:=13;
if(Dud>Uz+13*Du)and(Dud<Uz+14*Du)then An:=14;if(Dud>Uz+14*Du)and(Dud<Uz+15*Du)then An:=15;
if(Dud>Uz+15*Du)and(Dud<Uz+16*Du)then An:=16;if(Dud>Uz+16*Du)and(Dud<Uz+17*Du)then An:=17;
if(Dud>Uz+17*Du)and(Dud<Uz+18*Du)then An:=18;if(Dud>Uz+18*Du)and(Dud<Uz+19*Du)then An:=19;
if(Dud>Uz+19*Du)and(Dud<Uz+20*Du)then An:=20;if(Dud>Uz+20*Du)and(Dud<Uz+21*Du)then An:=21;
if(Dud>Uz+21*Du)and(Dud<Uz+22*Du)then An:=22;if(Dud>Uz+22*Du)and(Dud<Uz+23*Du)then An:=23;
if(Dud>Uz+23*Du)and(Dud<Uz+24*Du)then An:=24;if(Dud>Uz+24*Du)and(Dud<Uz+25*Du)then An:=25;
if(Dud>Uz+25*Du)and(Dud<Uz+26*Du)then An:=26;if(Dud>Uz+26*Du)and(Dud<Uz+27*Du)then An:=27;
if(Dud>Uz+27*Du)and(Dud<Uz+28*Du)then An:=28;if(Dud>Uz+28*Du)and(Dud<Uz+29*Du)then An:=29;
if(Dud>Uz+29*Du)and(Dud<Uz+30*Du)then An:=30;if(Dud>Uz+30*Du)and(Dud<Uz+31*Du)then An:=31;
if(Dud>Uz+31*Du)then An:=31;

```

```

if(Dud<0) and(Dud>-Uz) then An:=0; if(Dud<-Uz) and(Dud>-Uz-Du) then An:=-1;
if(Dud<-Uz-Du) and(Dud>-Uz-2*Du) then An:=-2;if(Dud<-Uz-2*Du) and(Dud>-Uz-3*Du)then An:=-3;
if(Dud<-Uz-3*Du) and(Dud>-Uz-4*Du) then An:=-4; if(Dud<-Uz-4*Du) and(Dud>-Uz-5*Du)then An:=-5;
if(Dud<-Uz-5*Du) and(Dud>-Uz-6*Du) then An:=-6; if(Dud<-Uz-6*Du) and(Dud>-Uz-7*Du)then An:=-7;
if(Dud<-Uz-7*Du) and(Dud>-Uz-8*Du) then An:=-8; if(Dud<-Uz-8*Du) and(Dud>-Uz-9*Du)then An:=-9;
if(Dud<-Uz-9*Du) and(Dud>-Uz-10*Du)then An:=-10;if(Dud<-Uz-10*Du)and(Dud>-Uz-11*Du)then An:=-11;
if(Dud<-Uz-11*Du)and(Dud>-Uz-12*Du)then An:=-12;if(Dud<-Uz-12*Du)and(Dud>-Uz-13*Du)then An:=-13;
if(Dud<-Uz-13*Du)and(Dud>-Uz-14*Du)then An:=-14;if(Dud<-Uz-14*Du)and(Dud>-Uz-15*Du)then An:=-15;
if(Dud<-Uz-15*Du)and(Dud>-Uz-16*Du)then An:=-16;if(Dud<-Uz-16*Du)and(Dud>-Uz-17*Du)then An:=-17;
if(Dud<-Uz-17*Du)and(Dud>-Uz-18*Du)then An:=-18;if(Dud<-Uz-18*Du)and(Dud>-Uz-19*Du)then An:=-19;
if(Dud<-Uz-19*Du)and(Dud>-Uz-20*Du)then An:=-20;if(Dud<-Uz-20*Du)and(Dud>-Uz-21*Du)then An:=-21;
if(Dud<-Uz-21*Du)and(Dud>-Uz-22*Du)then An:=-22;if(Dud<-Uz-22*Du)and(Dud>-Uz-23*Du)then An:=-23;
if(Dud<-Uz-23*Du)and(Dud>-Uz-24*Du)then An:=-24;if(Dud<-Uz-24*Du)and(Dud>-Uz-25*Du)then An:=-25;
if(Dud<-Uz-25*Du)and(Dud>-Uz-26*Du)then An:=-26;if(Dud<-Uz-26*Du)and(Dud>-Uz-27*Du)then An:=-27;
if(Dud<-Uz-27*Du)and(Dud>-Uz-28*Du)then An:=-28;if(Dud<-Uz-28*Du)and(Dud>-Uz-29*Du)then An:=-29;
if(Dud<-Uz-29*Du)and(Dud>-Uz-30*Du)then An:=-30;if(Dud<-Uz-30*Du)and(Dud>-Uz-31*Du)then An:=-31;
if(Dud<-Uz-31*Du)then An:=-31;

```

```

Cn:=Cn+An;if Cn>31 then Cn:=31;if Cn<0 then Cn:=0;

```

```

if Cn=0 then begin Rk1:=Rz; Rk2:=Rz; Rk3:=Rz; Rk4:=Rz;Rk5:=Rz end;
if Cn=1 then begin Rk1:=Ro1; Rk2:=Rz; Rk3:=Rz; Rk4:=Rz;Rk5:=Rz end;
if Cn=2 then begin Rk1:=Rz; Rk2:=Ro2;Rk3:=Rz; Rk4:=Rz;Rk5:=Rz end;
if Cn=3 then begin Rk1:=Ro1; Rk2:=Ro2;Rk3:=Rz; Rk4:=Rz;Rk5:=Rz end;
if Cn=4 then begin Rk1:=Rz; Rk2:=Rz; Rk3:=Ro3;Rk4:=Rz;Rk5:=Rz end;
if Cn=5 then begin Rk1:=Ro1; Rk2:=Rz; Rk3:=Ro3;Rk4:=Rz;Rk5:=Rz end;
if Cn=6 then begin Rk1:=Rz; Rk2:=Ro2;Rk3:=Ro3;Rk4:=Rz;Rk5:=Rz end;
if Cn=7 then begin Rk1:=Ro1; Rk2:=Ro2;Rk3:=Ro3;Rk4:=Rz;Rk5:=Rz end;
if Cn=8 then begin Rk1:=Rz; Rk2:=Rz; Rk3:=Rz ;Rk4:=Ro4;Rk5:=Rz end;
if Cn=9 then begin Rk1:=Ro1; Rk2:=Rz; Rk3:=Rz ;Rk4:=Ro4;Rk5:=Rz end;
if Cn=10 then begin Rk1:=Rz; Rk2:=Ro2;Rk3:=Rz ;Rk4:=Ro4;Rk5:=Rz end;
if Cn=11 then begin Rk1:=Ro1;Rk2:=Ro2;Rk3:=Rz ;Rk4:=Ro4;Rk5:=Rz end;
if Cn=12 then begin Rk1:=Rz; Rk2:=Rz; Rk3:=Ro3;Rk4:=Ro4;Rk5:=Rz end;
if Cn=13 then begin Rk1:=Ro1;Rk2:=Rz; Rk3:=Ro3;Rk4:=Ro4;Rk5:=Rz end;
if Cn=14 then begin Rk1:=Rz; Rk2:=Ro2;Rk3:=Ro3;Rk4:=Ro4;Rk5:=Rz end;
if Cn=15 then begin Rk1:=Ro1;Rk2:=Ro2;Rk3:=Ro3;Rk4:=Ro4;Rk5:=Rz end;
if Cn=16 then begin Rk1:=Rz; Rk2:=Rz; Rk3:=Rz; Rk4:=Rz;Rk5:=Ro5 end;
if Cn=17 then begin Rk1:=Ro1; Rk2:=Rz; Rk3:=Rz; Rk4:=Rz;Rk5:=Ro5 end;
if Cn=18 then begin Rk1:=Rz; Rk2:=Ro2;Rk3:=Rz; Rk4:=Rz;Rk5:=Ro5 end;
if Cn=19 then begin Rk1:=Ro1; Rk2:=Ro2;Rk3:=Rz; Rk4:=Rz;Rk5:=Ro5 end;
if Cn=20 then begin Rk1:=Rz; Rk2:=Rz; Rk3:=Ro3;Rk4:=Rz;Rk5:=Ro5 end;
if Cn=21 then begin Rk1:=Ro1; Rk2:=Rz; Rk3:=Ro3;Rk4:=Rz;Rk5:=Ro5 end;
if Cn=22 then begin Rk1:=Rz; Rk2:=Ro2;Rk3:=Ro3;Rk4:=Rz;Rk5:=Ro5 end;
if Cn=23 then begin Rk1:=Ro1; Rk2:=Ro2;Rk3:=Ro3;Rk4:=Rz;Rk5:=Ro5 end;
if Cn=24 then begin Rk1:=Rz; Rk2:=Rz; Rk3:=Rz ;Rk4:=Ro4;Rk5:=Ro5 end;
if Cn=25 then begin Rk1:=Ro1; Rk2:=Rz; Rk3:=Rz ;Rk4:=Ro4;Rk5:=Ro5 end;
if Cn=26 then begin Rk1:=Rz; Rk2:=Ro2;Rk3:=Rz ;Rk4:=Ro4;Rk5:=Ro5 end;
if Cn=27 then begin Rk1:=Ro1;Rk2:=Ro2;Rk3:=Rz ;Rk4:=Ro4;Rk5:=Ro5 end;
if Cn=28 then begin Rk1:=Rz; Rk2:=Rz; Rk3:=Ro3;Rk4:=Ro4;Rk5:=Ro5 end;
if Cn=29 then begin Rk1:=Ro1;Rk2:=Rz; Rk3:=Ro3;Rk4:=Ro4;Rk5:=Ro5 end;

```

```

if Cn=30 then begin Rk1:=Rz; Rk2:=Ro2;Rk3:=Ro3;Rk4:=Ro4;Rk5:=Ro5 end;
if Cn=31 then begin Rk1:=Ro1;Rk2:=Ro2;Rk3:=Ro3;Rk4:=Ro4;Rk5:=Ro5 end;

if (Abs(1-Udat)-Uz)>0 then Di:=Abs(1-Udat) else Di:=0;
IntD:=IntD+Di;
if (Abs(1-Udat)-0.025)>0 then Ti:=T;
Tw1:=DT*Ust/(Ust-Ua);Tw:=Tw+Tw1-DT;W1:=0.02/Tw;Tw:=DT-Tw1
end;

if Ic11>0 then begin if Ic11*Ic11s<0 then Rk11:=Rk1 end; Ic11s:=Ic11;
if Ic21>0 then begin if Ic21*Ic21s<0 then Rk21:=Rk1 end; Ic21s:=Ic21;
if Ic31>0 then begin if Ic31*Ic31s<0 then Rk31:=Rk1 end; Ic31s:=Ic21;
if Ic12>0 then begin if Ic12*Ic12s<0 then Rk12:=Rk2 end; Ic12s:=Ic12;
if Ic22>0 then begin if Ic22*Ic22s<0 then Rk22:=Rk2 end; Ic22s:=Ic22;
if Ic32>0 then begin if Ic32*Ic32s<0 then Rk32:=Rk2 end; Ic32s:=Ic32;
if Ic13>0 then begin if Ic13*Ic13s<0 then Rk13:=Rk3 end; Ic13s:=Ic13;
if Ic23>0 then begin if Ic23*Ic23s<0 then Rk23:=Rk3 end; Ic23s:=Ic23;
if Ic33>0 then begin if Ic33*Ic33s<0 then Rk33:=Rk3 end; Ic33s:=Ic33;
if Ic14>0 then begin if Ic14*Ic14s<0 then Rk14:=Rk4 end; Ic14s:=Ic14;
if Ic24>0 then begin if Ic24*Ic24s<0 then Rk24:=Rk4 end; Ic24s:=Ic24;
if Ic34>0 then begin if Ic34*Ic34s<0 then Rk34:=Rk4 end; Ic34s:=Ic34;

if Ic15>0 then begin if Ic15*Ic15s<0 then Rk15:=Rk5 end; Ic15s:=Ic15;
if Ic25>0 then begin if Ic25*Ic25s<0 then Rk25:=Rk5 end; Ic25s:=Ic25;
if Ic35>0 then begin if Ic35*Ic35s<0 then Rk35:=Rk5 end; Ic35s:=Ic35;

if Ua>=0 then begin Int:=Int+Um;Nu:=Nu+1 end
else begin Int:=0;Nu:=0 end;

Ust:=Ua;
  {**Finish for regulator**}
ASG(T,Y,F);
  {**Write in fale**}
  { if (T>Tcx+0.2) then Nf:=3; }

if (T>Tcx-1) then
  begin if A=0 then begin A:=1;T1:=T end;
    Tgr:=T-T1; {Ic11:=1+Uz+Du;Ic12:=1-Uz-Du;Ic13:=1+Uz;Ic14:=1-Uz;}
    WriteLn(Ft,Tgr:10:7); WriteLn(FUm, Um:10:7);
    WriteLn(FUdat,Udat:10:7);WriteLn(FUa,Ua);
    WriteLn(Fla,Ia:10:7);WriteLn(Flc1,Ic11:10:7);
    WriteLn(Flc2,Ic12:10:7);WriteLn(FW2,Y[5]:10:7);
    WriteLn(FAn,An);WriteLn(FCn,Cn);
    WriteLn(Flc3,Ic13:10:7);WriteLn(Flc4,Ic14:10:7);
    WriteLn(Flc5,Ic15:10:7);
  end;
  {**Integreting modul**}
1: ASG(T,Y,F);for J:=1 to N do
  begin K0[J]:=F[J]*DT*Wb;Y[J]:=W[J]+K0[J]/3 end;T:=T+DT/3;
  ASG(T,Y,F);for J:=1 to N do Y[J]:=W[J]+(K0[J]+F[J]*DT*Wb)/6;
  ASG(T,Y,F);for J:=1 to N do
  begin K2[J]:=F[J]*DT*Wb;Y[J]:=W[J]+K0[J]/8+K2[J]*3/8 end;
  T:=T+DT/6;
  ASG(T,Y,F);for J:=1 to N do
  begin K3[J]:=F[J]*DT*Wb;Y[J]:=W[J]+K0[J]/2-1.5*K2[J]+2*K3[J] end;
  T:=T+DT/2;
  ASG(T,Y,F);for J:=1 to N do
  begin K4[J]:=F[J]*DT*Wb;Y[J]:=W[J]+(K0[J]+4*K3[J]+K4[J])/6;
  Rm[J]:=Abs(-2*K0[J]+9*K2[J]-8*K3[J]+K4[J])/30 end;
  MaxR:=Rm[1]; for J:=2 to N do
    if Rm[J]>MaxR then MaxR:=Rm[J];
    if MaxR>E1 then begin T:=T-DT;DT:=DT/2;Y:=W;
      goto 1

```

```

        end
    else begin if MaxR<E1/50 then
        begin DT:=DT+DT; end;
        W:=Y;
    end
end; {Label 3}
if Mpp=0 then    {***}
    begin Mpp:=1;Tok:=Tcx+Tkp;IntD:=0;Gn:=Gv;Ln:=Lv;
        Rn:=Rv;DT:=0.0001;E1:=0.0001;

        goto 3
end;
Close(Ft); Close(FUm); Close(FUa); Close(FUdat); Close(FIa);
Close(FIc1);Close(FIc2); Close(FW2); Close(FAn); Close(FCn);
Close(FIc3);Close(FIc4);Close(FIc5);
WriteLn('IntD=',IntD:10:4);
WriteLn(' Ti=',Ti-Tcx:10:4);
WriteLn('Um=',Um:10:4);
WriteLn(' Udat=',Udat:10:4);
WriteLn(' Td=',Td-Tcx:10:4);
2: end.

```

ДОДАТОК Б - Програма реалізації вимірювання та регулювання трифазної
напруги асинхронного генератора на контролері Arduino Uno

```
bool _ByteToBit_4_outArray[8];
bool _ByteToBit_1_outArray[8];
bool _ByteToBit_2_outArray[8];
bool _gtv1 = 0;
float _gtv2 = 0;
float _gtv3 = 0;
float _gtv4 = 0;
float _gtv12 = 15;
float _gtv13 = 0;
float _gtv14 = 0;
float _gtv6 = 0;
bool _tim2I = 0;
bool _tim2O = 0;
unsigned long _tim2P = 0UL;
bool _gen3I = 0;
bool _gen3O = 0;
unsigned long _gen3P = 0UL;
byte _tempVariable_byte;
void setup()
{
    pinMode(14, INPUT);
    pinMode(10, OUTPUT);
    digitalWrite(10, 0);
    pinMode(1, OUTPUT);
    digitalWrite(1, 0);
    pinMode(2, OUTPUT);
    digitalWrite(2, 0);
    pinMode(3, OUTPUT);
    digitalWrite(3, 0);
    pinMode(4, OUTPUT);
    digitalWrite(4, 0);
    pinMode(5, OUTPUT);
    digitalWrite(5, 0);
    pinMode(6, OUTPUT);
    digitalWrite(6, 0);
    pinMode(7, OUTPUT);
    digitalWrite(7, 0);
    pinMode(8, OUTPUT);
    digitalWrite(8, 0);
    pinMode(12, OUTPUT);
    digitalWrite(12, 0);
    pinMode(11, OUTPUT);
    digitalWrite(11, 0);
    pinMode(9, OUTPUT);
    digitalWrite(9, 0);
    pinMode(13, OUTPUT);
    digitalWrite(13, 0);
}
```

```

    pinMode(0, OUTPUT);
    digitalWrite(0, 0);
}
void loop()
{
    //Плара:1
    _gtv1 = (digitalRead (14));
    _gtv2 = ((analogRead (1)))/(4.00);
    if ((_gtv2) > (_gtv3))
    {
        _gtv3 = _gtv2;
    }
    if (!(_gtv1))
    {
        if (_tim2I)
        {
            if (_isTimer(_tim2P, 8))
            {
                _tim2O = 1;
            }
        }
        else
        {
            _tim2I = 1;
            _tim2P = millis();
        }
    }
    else
    {
        _tim2O = 0;
        _tim2I = 0;
    }
    if (_tim2O)
    {
        _gtv3 = 0.00;
    }
    if (!(_gtv1))
    {
        _gtv6 = _gtv3;
    }
    if ((_gtv6) >= (4.00))
    {
        _gtv4 = (constrain((((analogRead (3)))/(3.00))-(_gtv6))/(4.00), (-10), (10)));
    }
    if (!((_gtv6) >= (4.00)))
    {
        _gtv4 = 0.00;
    }
    if (!((_gtv4) < (-2.00)))
    {
        _gtv14 = 0.00;
    }
}

```

```

if ((_gtv4) < (-2.00))
{
    _gtv14 = ((_gtv4)*(-1.00))-(-2.00);
}
if (!((_gtv4) > (2.00)))
{
    _gtv13 = 0.00;
}
if ((_gtv4) > (2.00))
{
    _gtv13 = (_gtv4)-(2.00);
}
if (!(_gtv1))
{
    if (! _gen3I)
    {
        _gen3I = 1;
        _gen3O = 1;
        _gen3P = micros();
    }
}
else
{
    _gen3I = 0 ;
    _gen3O = 0;
}
if (_gen3I && _gen3O) _gen3O = !(_isTimerMicros(_gen3P , 100));
if (_gen3O)
{
    _gtv12 = (constrain((( _gtv12)+(_gtv13)), (0), (31)));
}
if (_gen3O)
{
    _gtv12 = (constrain((( _gtv12)-(_gtv14)), (0), (31)));
}
_tempVariable_byte = _gtv13;
for (int i=0; i < 8; i++)
{
    _ByteToBit_1_outArray[i] = bitRead(_tempVariable_byte, i);
}
digitalWrite(0, _ByteToBit_1_outArray[0]);
_tempVariable_byte = _gtv14;
for (int i=0; i < 8; i++)
{
    _ByteToBit_2_outArray[i] = bitRead(_tempVariable_byte, i);
}
digitalWrite(1, _ByteToBit_2_outArray[0]);
_tempVariable_byte = _gtv12;
for (int i=0; i < 8; i++)
{
    _ByteToBit_4_outArray[i] = bitRead(_tempVariable_byte, i);
}

```

```

digitalWrite(12, _ByteToBit_4_outArray[4]);
digitalWrite(13, _ByteToBit_4_outArray[4]);
digitalWrite(10, _ByteToBit_4_outArray[3]);
digitalWrite(11, _ByteToBit_4_outArray[3]);
digitalWrite(6, _ByteToBit_4_outArray[2]);
digitalWrite(9, _ByteToBit_4_outArray[2]);
digitalWrite(8, _ByteToBit_4_outArray[1]);
digitalWrite(7, _ByteToBit_4_outArray[1]);
digitalWrite(2, _ByteToBit_4_outArray[0]);
digitalWrite(3, _ByteToBit_4_outArray[0]);
digitalWrite(4, _ByteToBit_4_outArray[0]);
digitalWrite(5, _ByteToBit_4_outArray[0]);
}
bool _isTimer(unsigned long startTime, unsigned long period)
{
    unsigned long currentTime;
    currentTime = millis();
    if (currentTime >= startTime)
    {
        return (currentTime >= (startTime + period));
    }
    else
    {
        return (currentTime >= (4294967295 - startTime + period));
    }
}
bool _isTimerMicros(unsigned long startTime, unsigned long period)
{
    unsigned long currentTime;
    currentTime = micros();
    if (currentTime >= startTime)
    {
        return (currentTime >= (startTime + period));
    }
    else
    {
        return (currentTime >= (4294967295 - startTime + period));
    }
}

```

ДОДАТОК В - Акти впровадження результатів дисертаційної роботи

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Проректор з науково-педагогічної роботи
Національного університету «Одеська Морська академія»,

д.т.н., професор

Вадим ЗАХАРЧЕНКО

« 18 » 02 2025 р.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

результатів дисертаційної роботи здобувача Вишневського Дмитра на тему
«Цифрові системи керування напругою суднової електроенергетичної
системи» в науково-дослідній роботі кафедри електричної інженерії
та електроніки

Здобувач Дмитро Вишневський приймав участь у науково-дослідній роботі кафедри електричної інженерії та електроніки за № ДР 0116U002392 «Підвищення ефективності роботи суднових електроенергетичних та електромеханічних систем» (2016 – 2020 р.р.). У заключному звіті Вишневський Дмитро виконав підрозділи 3.1 – 3.8 у розділі 3. «ВАРІАНТ ПЕРСПЕКТИВНОЇ КОМПОНОВКИ СУДНОВОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ».

Результати дослідження та розробки цифрових законів керування напругою асинхронних генераторів, а також конденсаторних установок компенсації реактивної потужності суднової електроенергетичної системи використовуються в науково-дослідній роботі кафедри за № ДР 0122U201978 «Технології підвищення енергоефективності суднових електроенергетичних і електромеханічних установок», (2022 – 2026 рр.).

Начальник науково-дослідної
частини НУ «ОМА»
к.т.н., с.н.с., професор



Віктор САВЧУК

Завідувач кафедри електричної
інженерії та електроніки,
д.т.н., професор



Микола МУХА

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Перший проректор Національного університету

«Одеська морська академія», д.т.н., професор

Олександр ШЕМЯКІН

» 19 » 02 2025 р.

АКТ ВИКОРИСТАННЯ

результатів дисертаційної роботи здобувача Вишневського Дмитра на тему
«Цифрові системи керування напругою суднової електроенергетичної
системи» в навчальний процес НУОМА

Науково-дослідні розробки Дмитра Вишневського з комп'ютерного моделювання типових перехідних процесів в судових електроенергетичних установках використовуються в процесі навчання магістрів за спеціальностями 271 «Морський та внутрішній водний транспорт» та 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології». Зокрема кваліфікаційні роботи магістрів Литвака О.В. та Колесніка С.В. виконані з використанням розробок здобувача. Окремі практичні та лабораторні роботи магістрів по курсу «Проектування та експлуатація систем автоматизації судових електроенергетичних установок» розроблені на базі комп'ютерного моделювання судових електроенергетичних установок.

Начальник навчального відділу

Микола ПАРХОМЕНКО

Завідувач кафедри електричної
інженерії та електроніки,
д.т.н., професор

Микола МУХА

Завідувач кафедри автоматизації
судових енергетичних
установок, к.т.н.

Ігор КОЗИРЕВ



07.02.25 № 0225-42

Національний університет «Одеська
морська академія» МОНУ
65029, м.Одеса, вул. Дідріхсона, 8, корп.1

АКТ

Впровадження результатів дисертаційної роботи Вишневецького Дмитра на тему «Цифрові системи керування напругою суднової електроенергетичної системи»

Науково-дослідні розробки Дмитра Вишневецького в напрямку підвищення енергоефективності суднових енергетичних установок за рахунок більш широкого використання асинхронних генераторів в багатогенераторних установках, як валогенераторів та утільтурбогенераторів, є перспективним заходом. Також викокистання конденсаторних блоків компенсації реактивного навантаження суднової електростанції зменшує встановлену потужність генераторів та загальний струм в фідерних мережах.

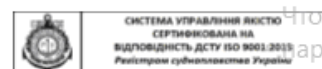
Пропозиції здобувача враховуються в роботі підприємства при проектуванні, виконанні ремонтних робіт, а також можуть враховуватися проектними організаціями під час модернізації та замовлення нових суден.

Директор ВФ "Судоремонт" у формі ТОВ

Д.Т.Н., доцент



О. М. Веретеннік



Актив
Чтобы :
араме