

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова  
Навчально-науковий інститут автоматики і електротехніки

## **АВТОМАТИКА ТА ЕЛЕКТРОТЕХНІКА**

### **МАТЕРІАЛИ**

Всеукраїнської науково-технічної конференції  
студентів, аспірантів та молодих вчених

*4–5 грудня 2025 року*

УДК 681.5:519.876  
A22

**ОРГАНІЗАТОРИ КОНФЕРЕНЦІЇ:**  
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ КОРАБЛЕБУДУВАННЯ  
ІМЕНІ АДМІРАЛА МАКАРОВА

**Відповідальний за випуск**  
Пальчиков Олег Олегович

*Матеріали публікуються за оригіналами, наданими авторами.  
Претензії до організаторів не приймаються*

**Автоматика та електротехніка** : матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених, м. Миколаїв, 4–5 грудня 2025 року / відпов. за вип. О. О. Пальчиков. [Електронний варіант]. – Миколаїв : НУК, 2025. – 153 с.

У збірнику подані матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Автоматика та електротехніка».

Розглянуті питання теорії, практики та розвитку електромеханічних систем і пристроїв суднового та загальнопромислового призначення, а також інформаційно-вимірювального обладнання.

Збірник може бути корисним для наукових співробітників, викладачів, інженерів та студентів.

УДК 681.5:519.876

© Національний університет кораблебудування  
імені адмірала Макарова, 2025

# ПЛЕНАРНА СЕКЦІЯ

УДК 621.311.243

*Волянський Ю. С., Яценко В. С., Мицик А. І., аспіранти PhD;*

*Волянська Я. Б., д.т.н., Волянський С. М., к.т.н.*

*Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв*

## МОДЕРНІЗАЦІЯ АРХІТЕКТУРИ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ ШЛЯХОМ ЗАСТОСУВАННЯ АКУМУЛЯТОРНИХ СИСТЕМ ЗБЕРІГАННЯ ЕНЕРГІЇ

Трансформація енергосистеми України під впливом загальноєвропейського курсу на декарбонізацію та бойових ушкоджень централізованої інфраструктури призводить до прискореного зростання частки децентралізованої генерації. Вагому частину цієї генерації становлять приватні сонячні електростанції (СЕС) малої та середньої потужності, підключені до розподільчих мереж 0,4–10 кВ і такі, що працюють за «зеленим» тарифом. Вони зменшують перетоки по мережах, знижують залежність споживачів від магістральних ліній і підвищують живучість електропостачання на локальному рівні [1].

**Метою роботи** є пошук варіантів модернізації СЕС та обґрунтування ефективності конструкції сонячної електростанції з накопичувачами енергії, орієнтованими на згладжування піків генерації.

Практика експлуатації показує, що фактичний виробіток СЕС часто обмежується не лише кліматичними умовами та характеристиками модулів, а й договірними та технічними обмеженнями з боку операторів системи розподілу. Типовий приклад – ситуація, коли встановлена потужність PV-поля суттєво перевищує допустиму потужність, яку інвертор і мережа можуть передавати в точку загального приєднання (АС-ліміт). У такому разі частина потенційного виробітку систематично «зрізається», що погіршує економіку проєкту, але водночас перерозмірене PV-поле дозволяє довше працювати на рівні ліміту, компенсуючи деградацію модулів та забруднення панелей. Додатковим чинником є наявність власного споживання у вузлі приєднання, яке частково «відбирає» генерацію, знижуючи обсяг відпуску в мережу, але підвищуючи ступінь використання встановленої потужності [2, 3].

Проводилися дослідження роботи типових СЕС зі встановленою потужністю PV-поля: близько 45 кВт DC. Сумарна номінальна потужність інверторів 30 кВт AC. Основна відмінність між станціями – структура й величина власних навантажень: в одному випадку власне споживання виражене сильніше, в іншому – станція більшу частину часу працює переважно на відпуск енергії в мережу.

Розроблено методику аналізу динаміки роботи СЕС, яка спирається на стандартні показники фотогальванічних систем і включає декілька рівнів обробки даних.

На першому етапі виконується попередня обробка та нормування даних, а саме:

- відбракування аномальних значень (від'ємна генерація, нулі у світлу пору доби, неповні доби / місяці);
- урахування періодів аварій, сервісних робіт і обмежень з боку мережі;
- нормування виробітку до встановленої потужності по DC та до AC-ліміту.

Наступні етапи включають в себе розрахунок:

- коефіцієнту використання встановленої потужності (K<sub>IUM</sub>);
- показника Performance Ratio (PR), який використовується для оцінювання сукупних втрат (оптичних, електричних, температурних, деградаційних тощо);
- втрат через AC-ліміт (clipping).

Після розрахунків будується модель деградації модулів. Для урахування старіння застосовується лінійна модель падіння ефективної DC-потужності. Порівняння фактичного зниження виробітку з розрахунковим дозволяє відокремити вплив деградації від змін у погоді та від додаткових втрат (забруднення, контактні опори тощо).

Використовуючи статистичні дані звітних форм, проводиться оцінка річного сумарного виробітку (власне споживання + відпуск у мережу) для кожної станції. Відмінності між станціями становлять 0–5 % і пояснюються насамперед відмінностями в структурі та рівні власного споживання: за більш розвиненого локального навантаження менше енергії «втрачається» через AC-ліміт, оскільки частина генерації використовується на місці.

Для встановленої потужності 45 кВт DC і AC-ліміту 30 кВт за річного виробітку порядку 45 МВт·год середній K<sub>IUM</sub> за AC-лімітом становить приблизно 0,17, що відповідає діапазону 0,16–0,20, характерному для мережних

PV-установок в умовах півдня України [4, 5]. Це підтверджує коректність вихідних даних і відсутність грубих аномалій у режимі роботи станцій.

За типового коефіцієнта деградації 0,5–0,8 % / рік внесок старіння модулів за три роки становить приблизно 1,5–2,5 %. Решта спостережуваного падіння виробітку пов'язана з погодою, режимами роботи та обмеженням за АС-лімітом. Це добре узгоджується з прийнятою лінійною моделлю деградації й методикою перерахунку питомого виробітку та PR за роками.

Наявність перерозміреного PV-поля (45 кВт за ліміту 30 кВт) пом'якшує вплив деградації: навіть за певного зниження ефективної потужності станції тривалість «полиці» на рівні 30 кВт залишається суттєвою, а відносні clipping-втрати зростають повільніше, ніж у випадку, якби PV-потужність була близькою до АС-ліміту.

Якісний аналіз добових профілів генерації показує ефективність використання встановленої потужності: у ясні весняно-літні дні добова крива потужності має виражену «полицю» на рівні 30 кВт у середині дня; у хмарні дні генерація рідко досягає АС-ліміту, і втрати є незначними.

Для характерного літнього місяця з виробітком порядку 6000 кВт·год на станцію питомий виробіток та CUF по DC і по АС-ліміту мають значення порядку 133–200 кВт·год / кВт на місяць і 0,18–0,27 відповідно, а PR становить близько 0,75–0,8, що відповідає нормальній роботі мережевої PV-установки з помірними втратами.

На основі вихідної конфігурації (45 кВт DC/30 кВт АС) та статистики виробітку розглянуто три варіанти архітектури: СЕС: без накопичувача енергії; з накопичувачем малої ємності (режим peak-shaving) та з накопичувачем середньої / великої ємності (перенесення генерації на вечір). Пріоритетним є третій варіант.

**Висновки.** Для типових літніх місяців оцінено питомий виробіток, KIUM та показник Performance Ratio СЕС. За даними звітних форм річний встановлено, що виробіток кожної станції, що досліджувались, становить орієнтовно 42,8–46,3 МВт·год, при цьому відмінності між станціями по роках досягають 4–5 % через відмінності в профілі навантаження споживачів.

Доведено, що АС-ліміт призводить до неминучих втрат енергії внаслідок «зрізання» піків генерації (clipping), а лінійна модель деградації модулів дозволяє пояснити спостережуване зниження питомого виробітку в динаміці.

На основі отриманих результатів сформовано набір варіантів модернізації архітектури СЕС із застосуванням акумуляторних систем зберігання енергії (накопичувачів енергії), орієнтованих на згладжування піків генерації та перенесення частини виробітку на вечірні години. Проведено орієнтовні оцінки необхідної потужності та ємності накопичувачів енергії за статистикою «зрізаної» енергії та за цільовим рівнем вирівнювання навантаження. Сформульовано практичні рекомендації та напрями подальших досліджень, включно з інтеграцією результатів у цифровий двійник локальної енергосистеми.

#### Список використаних джерел

1. Alrashidi A. Photovoltaic degradation rate affected by different weather conditions: A case study based on PV systems in the UK and Australia. Electronics / A. Alrashidi, M. Dhimish // Electronics, 2020. – Vol. 9. – № 4 : 650. DOI: 10.3390/electronics9040650.
2. Dhimish M. Performance ratio and degradation rate analysis of 10-year field exposed residential photovoltaic installations in the UK and Ireland / M. Dhimish // Clean Technologies, 2020. – Vol. 2. – № 2. – P. 170–183. DOI: 10.3390/cleantechnol2020012.
3. Kim J. A review of the degradation of photovoltaic modules for life expectancy / Kim J., Rabelo M., Padi S. P., Yousuf H., Cho E.-C., Yi J. // Energies, 2021. – Vol. 14 – № 14 : 4278. DOI: 10.3390/en14144278.
4. Jo K.-Y., Go S.-I. Operation method of PV–battery hybrid systems for peak shaving and estimation of PV generation / K.-Y. Jo, S.-I. Go // Electronics, 2023. – Vol. 12. – № 7 : 1608. DOI: 10.3390/electronics12071608.
5. Værbak M. A digital twin framework for simulating distributed energy resources in distribution grids / Værbak M., Billanes J. D., Jørgensen B. N., Ma Z. // Energies, 2024. – Vol. 17. – № 11 : 2503. DOI: 10.3390/en17112503.

УДК 621.31

Макаренко Д. С., Козлов М. О., PhD

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв

## ОГЛЯД КОТУШОК РОГОВСЬКОГО ТА ОСОБЛИВОСТЕЙ ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ В ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМАХ

Вимірювання електричного струму є ключовим елементом функціонування електроенергетичних систем. Від побутових споживачів до високовольтних мереж вимірювання струму забезпечує моніторинг, захист, керування та

облік електроенергії [1, 2]. Внаслідок ускладнення сучасних електроенергетичних систем – збільшення частки розподіленої генерації, появи реверсивних потоків потужності, широкого використання силових напівпровідникових перетворювачів – вимоги до датчиків струму стають жорсткішими: необхідні висока лінійність, широкий частотний діапазон, швидкодія та відсутність насичення. На тлі недоліків та обмежень шунтів, трансформаторів струму (ТС) та датчиків заснованих на ефекті Хола [3], котушки Роговського (КР) вирізняються поєднанням широкої смуги частот, ненасичуваності, точності та зручності встановлення [4, 5].

**Метою роботи** є огляд конструктивних особливостей, принципів роботи, напрямів застосування котушок Роговського в енергосистемах, а також їхніх переваг і обмежень.

#### **Переваги та особливості котушок Роговського**

Котушка Роговського – це гнучкий роз'ємний датчик струму (рис. 1). Без магнітного осердя, який чутливий до похідної струму, що протікає по досліджуваному провіднику. Відсутність феромагнітного осердя забезпечує ненасичуваність навіть за струмів у десятки кілоампер, високу лінійність у всьому робочому діапазоні, широку смугу пропускання частот – від десятків герц до сотень мегагерц, стійкість у перехідних процесах і мінімальний температурний вплив [6]. Невелика маса, гнучке виконання, можливість встановлення в готові електроенергетичні системи забезпечує попит на КР не лише в класичній енергетиці, а й у системах силової електроніки, де традиційні ТС проявляють насичення та нелінійність.

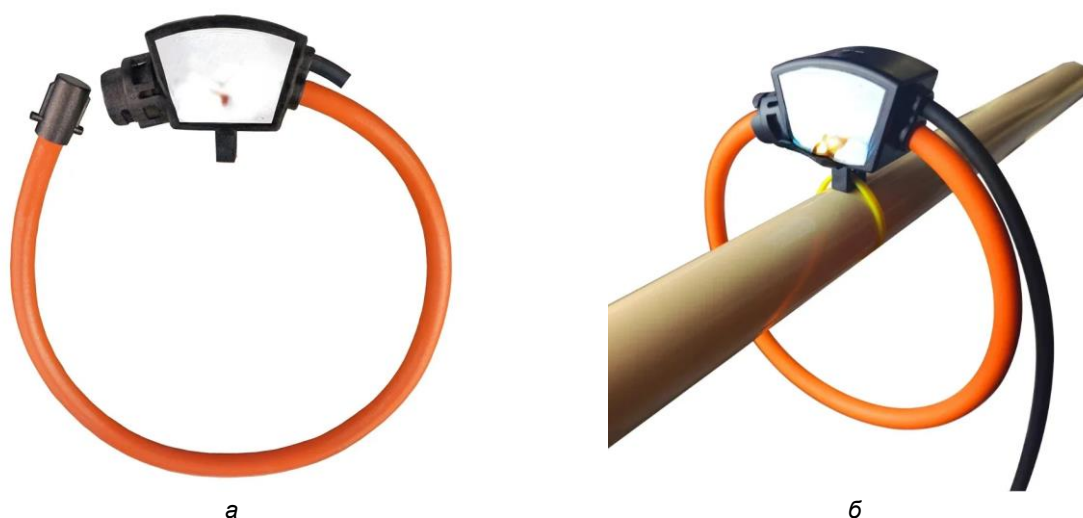


Рисунок 1 – Зовнішній вигляд (а) та спосіб монтажу (б) датчику струму – котушка Роговського

#### **Застосування КР у електроенергетичних системах**

У мережах середньої та високої напруги, де робочі струми сягають десятків кілоампер, КР дозволяють усунути похибки, спричинені насиченням ТС. Вони ефективні при вимірюванні струмів комутації силових ключів, імпульсних навантажень, розрядних процесів, струмів блискавки, а також струмів силових імпульсних установок і випрямлячів – у всіх випадках, коли амплітуди струму можуть досягати сотень кілоампер або навіть мегаампер, а швидкості наростання – десятків кА/мкс [7, 8].

Передавальні процеси в ізоляції супроводжуються високочастотними імпульсами малої амплітуди, тривалістю у наносекунди та величиною всього в міліампери. Спеціально розроблені котушки з мінімальною кількістю витків та оптимізованими інтеграторами дозволяють реєструвати такі сигнали на частотах до сотень мегагерц, забезпечуючи раннє виявлення дефектів трансформаторів, кабельних ліній, розподільчих пристроїв та електричних машин.

#### **Конструктивні особливості КР**

Під час проектування враховують кількість витків, довжину котушки, діаметр і форму, тип провідника, тип інтегратора (пасивний, активний або цифровий), а також схеми екранування та ізоляції [9]. Збільшення кількості витків підвищує чутливість, але зменшує верхню робочу частоту через зростання індуктивності та паразитної ємності. Зменшення кількості витків розширює смугу частот, але потребує більш чутливої електроніки. Оптимальний баланс цих параметрів визначає точність і функціональні можливості датчика.

#### **Негативні сторони та обмеження котушок Роговського**

Попри значні переваги, КР мають низку особливостей, що обмежують їх використання і потребують врахування при їх проектуванні та експлуатації [11].

Насамперед вони не здатні вимірювати постійний струм, оскільки реагують лише на зміну магнітного поля. Через це необхідний високоякісний інтегратор, від стабільності якого безпосередньо залежить точність сигналу.

Будь-який температурний дрейф або нестабільність інтегратора призводять до зміщення нуля, накопичення похибки та спотворення повільно змінних сигналів.

Через відсутність феромагнітного осердя та широку смугу пропускання КР більш чутливі до зовнішніх електромагнітних завад. За відсутності екранування, неправильної прокладки кабелів або диференціальних конструкцій можливі хибні імпульси та електромагнітні шуми.

Під час вимірювання малих струмів обмеженням є низька амплітуда вихідного сигналу, яка може бути співмірною з шумами електроніки, тому потрібен якісний малошумний підсилювач. Це особливо важливо під час реєстрації часткових розрядів.

Додаткові труднощі пов'язані з геометрією котушки: чутливість залежить від кількості витків, діаметра та точного розташування провідника відносно центру. Навіть незначні геометричні відхилення змінюють коефіцієнт передавання, що робить необхідною індивідуальну калібровку кожного екземпляра. Окрім того, КР потребують точного монтажу – зміщення котушки відносно провідника впливає на точність значно більше, ніж у ТС.

### Висновки

Котушки Роговського – універсальні датчики струму, що поєднують високу лінійність, широку смугу частот і відсутність насичення. Вони незамінні для вимірювань у сучасних енергосистемах, особливо там, де важливими є швидкодія, точна реєстрація перехідних процесів, гармонік і імпульсних струмів. Гнучкість проектування дає змогу адаптувати їх як для діагностики часткових розрядів, так і для реєстрації надвеликих короткочасних струмів.

Застосування КР активно розширюється в напрямку інтелектуальних мереж, моніторингу обладнання розподільчих підстанцій, електричних машин, кабельних ліній і силової електроніки. Водночас зберігається потреба в подальших дослідженнях, спрямованих на підвищення точності, покращення завадостійкості та оптимізацію конструктивних рішень як самої котушки, так і інтеграторів вихідного сигналу.

### Список використаних джерел

1. Diefenderfer P., Jansson P. M. and Prescott E. R., "Application of power sensors in the controland monitoring of a residential microgrid," 2015 IEEE Sensors Applications Symposium (SAS), pp. 1–6, 2015.
2. Browne T. J., Stahlhut J. W., Heydt G. T., Jewell W. T. and Bezawada R., "Innovative and massively deployed sensors in electric power systems," IEEE Power and Energy Society General Meeting – Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, pp. 1–6, 2008.
3. Bagheri A., Allahbakhshi M., Behi D. and Tajdinian M., "Utilizing Rogowski coil for saturation detection and compensation in iron core current transformer," Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE), pp. 1066–1071, 2017.
4. Xiao C., Zhao L., Asada T., Odendaal W. G., van Wyk J. D., "An Overview of Integratable Current Sensor Technologies," Industry Applications Conference, 38th IAS Annual Meeting, Vol. 2, pp. 1251–1258, 2003.
5. Marco C., Syeda S. F., and Gibiino G. P., "Hall-effect current sensors: Principles of operation and implementation techniques." IEEE Sensors Journal, 2021.
6. Kojovic L. A., Beresh L. and R., "Practical Aspects of Rogowski Coil Applications to Relaying IEEE Power Engineering Society–Special Report," 2010.
7. Mähönen P. and Virtanen V., "The Rogowski Coil and the Voltage Divider in Power System Protection and Monitoring," ABB Transmit Oy, Vaasa, Finland, 2020.
8. Zhang, Ming, et al. "Design and test of a new high-current electronic current transformer with a Rogowski coil," Metrology and Measurement Systems, 2014.
9. Pang F., Gao L., Yuan Y., Qiangsheng B., Jianfei J., "Effects of geometrical parameters on the performance of Rogowski coil for current measuring," IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), pp. 232–236, 2016.
10. Shafiq M., G Hussain., Kütt L., and Lehtonen M., "Effect of geometrical parameters on high frequency performance of Rogowski coil for partial discharge measurements," Measurement, vol. 49, pp.126–137, 2014.
11. Riehl R. R., de Castro B. A., Fraga J. R. C. P., Puccia V., Lucas G. B., and Andreoli A. L., "Assessment of Rogowski Coils for Measurement of Full Discharges in Power Transformers," Engineering Proceedings, vol. 10, no. 1, 16, 2021.

## УДК 681.5

Тимченко А. С., Федоров А. Д., Савченко О. В., ст. викладач, Іванов А. В., к.т.н.

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв

## ДОСВІД ВИКОРИСТАННЯ КОНСТРУКТОРА ПЕРСОНАЛЬНОГО СУПУТНИКА

Супутник *Mysat* [1] належить до класу малих космічних апаратів і призначений для виконання базових моніторингових та дослідницьких задач. Конструкція супутника передбачає компактне компонування приладів із збереженням функціональної гнучкості та можливості розширення програмного забезпечення [1]. До складу бортового обладнання входить стандартна набірна система датчиків, що забезпечує вимірювання основних параметрів орієнтації, руху та навколишнього середовища. Зокрема, встановлені:

- інерціальні датчики (акселерометри та гіроскопи), які забезпечують контроль динаміки руху супутника та використовуються у системі стабілізації;
- магнітометр, що дає змогу визначати орієнтацію відносно магнітного поля Землі; датчики температури для контролю теплового режиму корпусу та бортових модулів;
- освітлені датчики (сенсори Сонця), які можуть застосовуватись у системі визначення просторової орієнтації;
- барометричні або інші сенсори довкілля, залежно від конфігурації місії.

На борту також передбачена камера середньої роздільної здатності, яка використовується для отримання зображень поверхні Землі, тестування алгоритмів комп'ютерного зору або контролю положення апарата. Камера компенсує обмеження малого форм-фактора за рахунок оптимізованої системи обробки зображень. Бортова електроніка супутника підтримує базові функції телеметрії, передачі команд, автономного контролю систем та обробки даних. Завдяки модульності архітектури супутник може адаптуватися до різних типів місій – від навчальних до прикладних досліджень. Також є наявність сонячних панелей для додаткового живлення апарату. Вони закріплені на механізмі зі функцією складання/розкладання модулів живлення. Завдяки посиленого сервоприводу, маємо плавну та стабільну роботу у різних положеннях і зовнішніх умовах. На рис. 1 наведено структурну схему, яка більш детально описує зв'язок модулів між собою та конкретні моделі, які використовуються в моделі супутника. В супутнику використано наступні модулі:

- *ESP32-Cam* – центральний обчислювальний модуль [3];
- *Arduino nano* – виконавчий блок [2];
- *MPU-9250/6500* – модуль інерційної навігації (акселерометр, гіроскоп, магнітометр);
- *BME680* – датчик параметрів навколишнього середовища (температура, вологість, тиск, гази);
- *DS3231* – точний годинник реального часу;
- *ADS1015* – АЦП для отримання аналогових вимірювань (наприклад, з сонячного навігаційного сенсора) [4];
- *OV2640* – модуль фотофіксації;
- *HC-12* – радіомодуль;
- *MG90S* – сервомотор для керування кутом нахилу сонячних панелей.

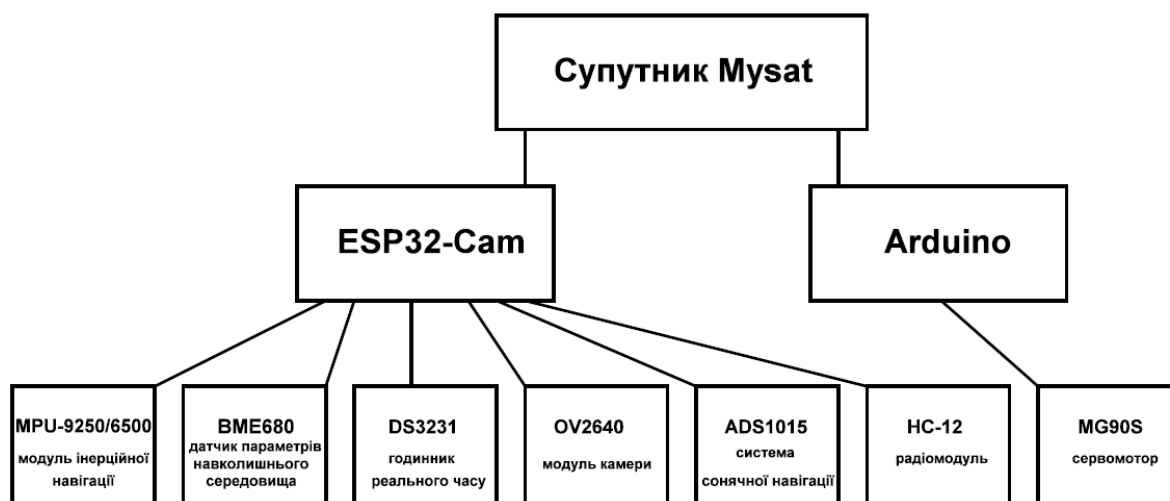


Рисунок 1 – Структурна схема супутника

Обмін даними між *ESP32-Cam* та *Arduino* виконується через *I2C* інтерфейс, *ESP32-Cam* працює як майстер, *Arduino* – як слейв. *Arduino*[2] як виконавчий блок отримує команди через *I2C* від *ESP32-Cam*, а також керує сервоприводом *MG90S* для контролю кута нахилу сонячних панелей

Алгоритм роботи програми наведено на блок-схемі, яка показана на рис. 2.

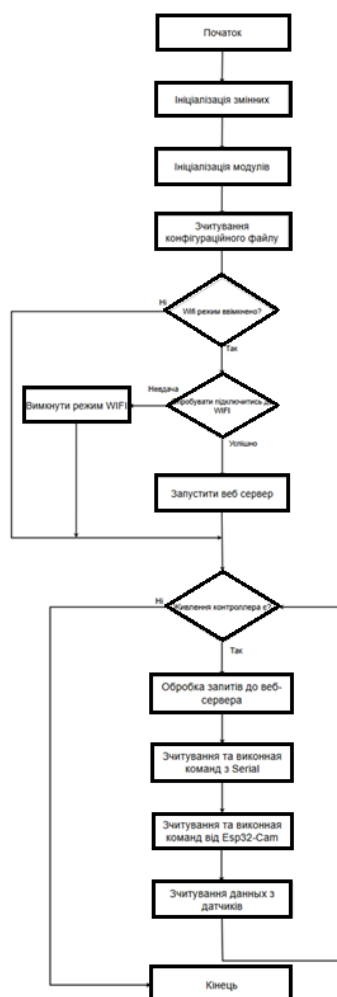


Рисунок 2 – Блок-схема алгоритму роботи супутника

Також було впроваджено алгоритм затримки часу між рухом панелей, що дозволило отримати більш плавне керування кутом нахилу модулів. Було додано динамічну функцію швидкості руху відкриття/закриття, додано збір телеметрії в реальному часі, а також оптимізовано програму за допомогою переведення багатьох функцій по збору даних з датчиків у фоновий режим.

**Висновок.** Після оптимізації програмного коду, ми отримали оптимізацію відклику від робота з 2–10 секунд до 0.05–0.3 секунд, що є гарним результатом. Також були модернізовані деталі корпусу для більш чіткої роботи та покращення міцності корпусу. Після тестів механізму з сервоприводом, було замінено серводвигун на більш потужну версію, що покращило енергоефективність та стабільність механізму.

#### Список використаних джерел

1. Набір з функціями реального супутника // Електронний ресурс – режим доступу <https://www.mysat.com.ua/start/>
2. Arduino Nano 33 // Електронний ресурс – режим доступу <https://store.arduino.cc/products/arduino-nano-33-iot>
3. ESP32-CAM Development Board // Електронний ресурс – режим доступу [https://media.digikey.com/pdf/Data%20Sheets/DFRobot%20PDFs/DFR0602\\_Web.pdf](https://media.digikey.com/pdf/Data%20Sheets/DFRobot%20PDFs/DFR0602_Web.pdf)
4. Ultra-Small, Low-Power, 12-Bit Analog-to-Digital Converter with Internal Reference // Електронний ресурс – режим доступу <https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/ads1015.pdf>

УДК 681

Савун І. А., Москва В. В., Ушкаренко О. О., д.т.н.

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв

## ІНСТРУМЕНТАЛЬНІ ЗАСОБИ МОДЕЛЮВАННЯ ЦИФРОВИХ ФІЛЬТРІВ У ВБУДОВАНИХ МІКРОПРОЦЕСОРНИХ СИСТЕМАХ

**Вступ.** Цифрова обробка сигналів (ЦОС) є невід'ємною частиною сучасних вбудованих мікропроцесорних систем керування, збору та обробки даних, які застосовуються у телекомунікаціях, навігації, перетворювальній, вимірювальній техніці та промисловій автоматизації. Реалізація алгоритмів цифрової фільтрації безпосередньо на мікроконтролерах потребує інструментів, які забезпечують не лише програмування, але й детальне моделювання, налагодження, аналіз часових характеристик та візуалізацію результатів обробки сигналів. В [1] продемонстровано, що використання формальних і графічних моделей для опису структур ЦОС-систем істотно спрощує проектування та подальшу програмну реалізацію цифрових фільтрів (ЦФ) у системах обробки сигналів. Структурно-функціональний підхід до опису систем ЦОС, як показано в [2], забезпечує узгодженість між математичними моделями та програмною реалізацією алгоритмів на мікропроцесорних платформах. Сучасні оглядові дослідження, зокрема [3], демонструють значний прогрес у розвитку алгоритмів ЦОС, однак майже не розкривають питань їх практичної інтеграції у ресурсообмежені мікроконтролерні системи. У роботі [4] показано окремі аспекти впливу оптимізації компілятора та особливостей мікроконтролерів STM32 на якість роботи ЦФ, проте відсутня цілісна методика, яка б охоплювала весь цикл – від моделювання структури фільтра до його коректної верифікації на реальному обладнанні. Таким чином, залишається невирішеною проблема комплексного підходу до моделювання, реалізації та налагодження цифрових фільтрів у вбудованих мікропроцесорних системах, що і становить предмет даного дослідження.

**Мета дослідження** полягає в розробці та експериментальній перевірці методики моделювання й налагодження цифрових фільтрів на мікроконтролерах сімейства STM32 із використанням бібліотеки CMSIS-DSP та середовища розробки Keil uVision.

**Основна частина.** Мікроконтролери STM32, оснащені ядрами Cortex-M з апаратним блоком FPU, підтримують операції із плаваючою комою, а у поєднанні з бібліотекою CMSIS-DSP та інструментами Keil uVision та STM32CubeMX, надають широкі можливості для розробки та тестування цифрових фільтрів у режимі реального часу [4]. Це дозволяє виконувати повний цикл – від конфігурування тактових частот та генерації коду до покрокового дослідження фільтрів за допомогою вбудованого логічного аналізатора. Для дослідження програмно реалізованого ЦФ було використано мікроконтролер STM32F411RE, що встановлений на платі STM32 Nucleo. Налаштування проєкту здійснювалося у середовищі STM32CubeMX, в якому задається конфігурація тактових частот, зокрема робота на частоті 100 МГц, що є суттєвим для ефективної реалізації алгоритмів ЦОС.

На етапі програмування використано середовище Keil uVision із підключенням пакетів CMSIS-Core, CMSIS-DSP, Device Startup та HAL-бібліотеки. Для налагодження програмного забезпечення було використано вбудований ST-Link Debugger та інструменти логічного аналізатора, що дають змогу в режимі реального часу спостерігати за значеннями вибірок сигналу до і після цифрової обробки. Власне, сама обробка сигналу виконується програмно реалізованим фільтром зі скінченною імпульсною характеристикою (CIX) низьких частот. Також, для порівняння коректності реалізованого алгоритму, цифрову обробку тестового сигналу було реалізовано з використанням бібліотечної функції `arm_fir_f32()`. Фільтр має 29 коефіцієнтів, обчислених заздалегідь. Фільтр синтезовано за допомогою віконного методу [5], при цьому використано вікно Хеммінга як вагову функцію. Коефіцієнти цифрового CIX-фільтра розташовано в масиві:

```
const float32_t firCoeffs32[29] = {-0.0018225230, -0.0015879294, 0, 0.0036977508, 0.0080754303, 0.0085302217, 0, -0.0173976984, -0.0341458607, -0.0333591565, 0, 0.0676308395, 0.1522061835, 0.2229246956, 0.2504960933, 0.2229246956, 0.1522061835, +0.0676308395, 0, -0.0333591565, -0.0341458607, -0.0173976984, 0, 0.0085302217, 0.0080754303, +0.0036977508, 0, -0.0015879294, -0.0018225230};
```

Процес фільтрації виконується блоками з використанням проміжного буфера стану фільтра, розмір якого відповідає вимогам CMSIS-DSP. Розмір блоку `BLOCK_SIZE` дорівнює 32, який було вибрано експериментально як компроміс між продуктивністю та обсягом використаної пам'яті. При використанні бібліотечних функцій спочатку відбувається процес ініціалізації:

```
arm_fir_init_f32(&fir, NUM_TAPS, firCoeffs32, firStateF32, BLOCK_SIZE).
```

Процес цифрової обробки сигналу відбувається використанням наступної функції:

```
arm_fir_f32(&fir, input + i*BLOCK_SIZE, output + i*BLOCK_SIZE, BLOCK_SIZE).
```

Під час відлагодження ЦФ було використано можливості логічного аналізатора Keil, які забезпечують візуальний аналіз часових рядів, що значно спрощує оцінку роботи фільтра та точність реалізованих алгоритмів. Зокрема, у наведеному прикладі показано діалогове вікно логічного аналізатора (рис. 1), в якому можна спостерігати одночасно вхідний та вихідний сигнали.

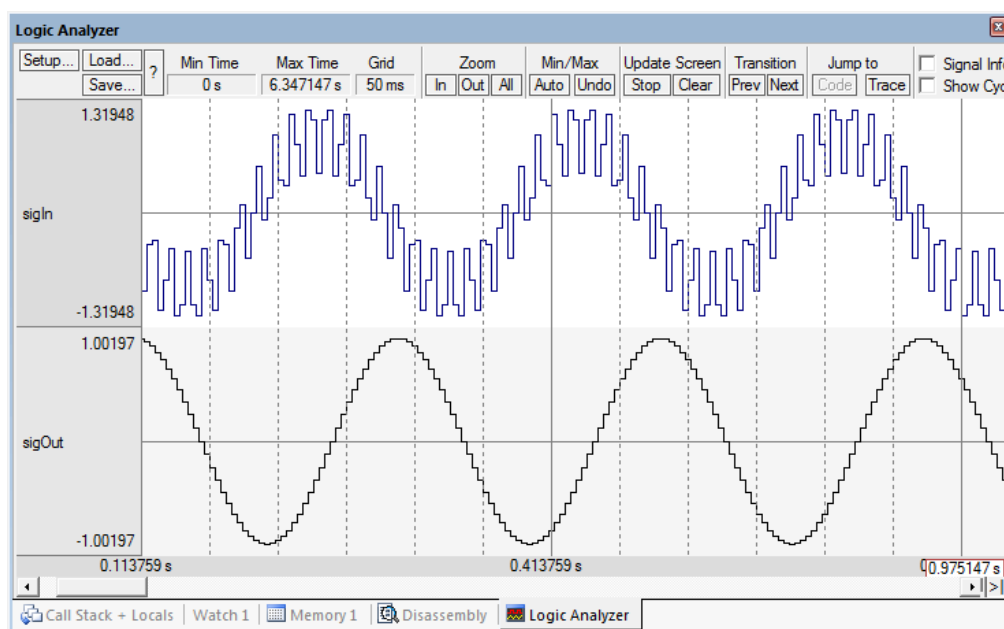


Рисунок 1

Після фільтрації високочастотна складова зменшилася більш ніж у 12 разів (за піковими значеннями). Графічно це підтверджено у логічному аналізаторі (див. рис. 1). Збіг результатів власної реалізації та CMSIS-DSP показав коректність роботи реалізованих функцій. СІХ-фільтр обробив масив із 320 відліків за 0,134 мс при тактовій частоті мікроконтролера 100 МГц, що відповідає  $\sim 2,38$  MFLOPS для даної операції. Отримані результати свідчать про те, що мікроконтролери STM32 здатні виконувати цифрову фільтрацію у реальному часі без значного навантаження на процесор. Завдяки апаратній підтримці операцій з плаваючою комою у мікроконтролерах STM32F4 вдається досягти високої продуктивності, що робить можливим застосування реалізованих алгоритмів у системах реального часу.

**Висновки.** У роботі продемонстровано комплексний підхід до моделювання та налагодження цифрових фільтрів, реалізованих на мікроконтролерах сімейства STM32. Використання середовищ STM32CubeMX та Keil uVision у поєднанні з бібліотекою CMSIS-DSP дозволяє ефективно розробляти, тестувати та візуалізувати алгоритми цифрової обробки сигналів без необхідності застосування зовнішніх засобів моделювання. Результати моделювання підтверджують, що мікроконтролери STM32 є придатними для реалізації складних алгоритмів ЦОС, включаючи СІХ-фільтрацію, згортку та статистичну обробку сигналів. Розглянутий підхід може бути використаний в освітніх цілях, наукових дослідженнях, а також при створенні промислових вбудованих систем керування, збору та обробки даних.

#### Список використаних джерел

1. Mahmoud M. S. Al-suod. Development of Graphical Analytical Models for Digital Signal Processing System Structures / Al-suod Mahmoud M. S., Ushkarenko O., Abdel Hamid Soliman, Mahmoud Zeidan, Abdullah M. Eial Awwad, Alaa M. Al-Quteimat // Jordan Journal of Electrical Engineering. 2020. Vol. 6, No. 2. P. 140–153.
2. Редька І. В. Принципи опису систем цифрової обробки сигналів на структурно-функціональному рівні / І. В. Редька, О. І. Трешнюк, О. О. Ушкаренко // Автоматика та електротехніка : матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених. Миколаїв : НУК, 2023. С. 57–59.

3. Sadeghi S. A Comprehensive Review of Digital Signal Processing (DSP) Algorithms and Their Applications in Telecommunication and Wireless Communication Systems / S. Sadeghi // International Journal of Engineering & Technology Sciences. 2025. Vol. 2025. P. 1–60.

4. Zubkov O. Features of the Digital Filters Implementation on STM32 Microcontrollers / O. Zubkov, I. Svyd, O. Vorgul // In Proc. of the III International Scientific and Practical Conference Theoretical and Applied Aspects of Device Development on Microcontrollers and FPGAs (MC&FPGA-2021), Kharkiv, Ukraine, 2021. P. 6–8. DOI: 10.35598/mcfpga.2021.001

5. Рябенський В. М. Програмна реалізація алгоритмів цифрової обробки сигналів / В. М. Рябенський, О. О. Ушкаренко. Миколаїв : НУК, 2016. 244 с.

УДК 621.314

Обрубов А. В., д.т.н., Обрубов В. А., студ. магістратури

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПОВЕДІНКИ РЕЗОНАНСНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА З АВТОГЕНЕРАЦІЄЮ ПРИ ФАЗОВО-РЕЛЕЙНОМУ РЕГУЛЮВАННІ

Метою роботи є теоретичне визначення залежностей робочої частоти резонансного перетворювача електроенергії з автогенерацією коливань і з фазово-релейним способом регулювання від параметрів схеми та експериментальне дослідження його поведінки при зміні параметрів резонансного контуру та частоти фазозсувного фільтра зворотного зв'язку.

### ДОСЛІДЖУВАНА СХЕМА ПЕРЕТВОРЮВАЧА

Функціональна схема резонансного перетворювача з трьома варіантами позитивного зворотного зв'язку (ПЗЗ) на рис. 1 містить наступні елементи: ІН – інвертор напруги класу D; В – випрямляч; ДС, ДН – датчики струму і напруги; К – комутатор сигналу; РЕ – релейний елемент; РВВ – регулятор вихідних величин; АВ – аналоговий вихід; РВ – релейний вихід; ФЗФ – фазозсувний фільтр.

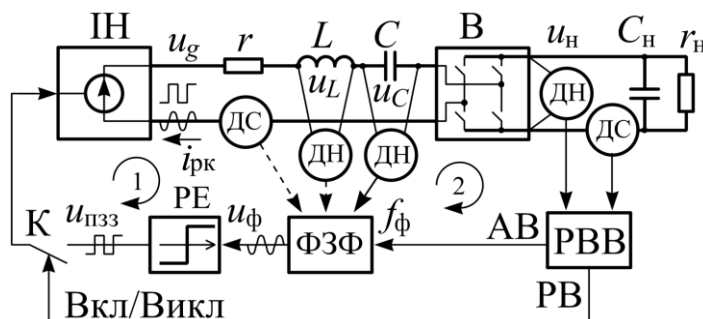


Рисунок 1 – Функціональна схема резонансного перетворювача з автогенерацією

Перетворювач на рис. 1 має контур ПЗЗ номер 1 за коливаннями струму або напруг і контур негативного зворотного зв'язку номер 2 за вихідними напругою то струмом. Для запуску та автогенерації коливань в ПЗЗ сигнал одного з датчиків (ДС або ДН) подається на ФЗФ, тип якого залежить від задіяного датчика: фільтр високих частот при сигналі від датчика струму ДС резонансного контуру  $i_{рк}$ ; фільтр низьких частот при сигналі від датчика напруги ДН на резонансній індуктивності  $u_L$  або смуговий фільтр при сигналі від датчика напруги ДН на резонансній ємності  $u_C$ . Тепловий шум датчиків та ФЗФ викликає початкові малі коливання, достатні для перемикання РЕ. Завдяки ПЗЗ коливання посилюються і наростають до стаціонарної величини. Частота автогенерації  $f_g$  відрізняється від резонансної частоти контуру  $f_0=1/(2\cdot\pi\cdot\sqrt{L\cdot C})$ , оскільки ФЗФ створює регульований фазовий зсув сигналів. Фазове регулювання здійснюється шляхом регулювання частоти налаштування ФЗФ  $f_\phi$  від аналогового виходу АВ регулятора вихідних величин РВВ, що призводить до зміни частоти автогенерації  $f_g$ . З виходу ФЗФ сигнал надходять на релейний елемент РЕ, який перетворює сигнали з формою близькою до синусоїди в прямокутний сигнал ПЗЗ  $u_{ПЗЗ}$ , що управляє станами ключів інвертору напруги ІН. Автоматичне регулювання вихідних величин здійснюється за зворотним зв'язком по вихідному струму, якщо він більший за задане значення струму, або

за зворотним зв'язком по вихідній напрузі, якщо напруга більша за задану напругу, за допомогою регулятора вихідних величин РВВ з двома виходами АВ і РВ. Аналоговий вихід АВ призначений для керування частотою ФЗФ при вихідному струмі в межах 50–100 % від максимального, а релейний вихід РВ – для керування роботою інвертору напруги ІН через комутатор К при вихідному струмі 0–50 % від максимального. Коли комутатор К включений, прямокутна напруга  $u_g$  на виході інвертору по частоті і фазі відповідає напрузі  $u_{пзз}$ . При виключеному комутаторі К напруга на виході інвертору близька до нуля.

### РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТІВ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Експерименти імітаційного моделювання було проведено зі схемною моделлю РПЕ на рис. 2. Умови проведення експериментів вказано нижче. Параметри резонансного контуру: резонансна частота  $f_0 \approx 10000$  Гц; добротність контуру  $Q = 2$  для  $r = 0.795$  Ом та  $Q = 10$  для  $r = 0.159$  Ом; частота вільних коливань (демпфована частота) становить  $f_1 \approx 9688$  Гц для  $Q = 2$  та  $f_1 \approx 9993$  Гц для  $Q = 10$ . Напруга живлення інвертору  $U_{ж} = 100$  В. Параметри навантаження моделі РПЕ:  $C_H = 2200$  мкФ;  $R_H = 1$  Ом.

В ході експериментів модель на рис. 2 запускалася в роботу кожного разу з нульовими початковими умовами. Було отримано сімейства часових характеристик при різних значеннях добротності контуру, частоти налаштування ФЗФ і опору навантаження. Добротність контуру змінювалася за допомогою зміни опору  $r$ . Постійні часу ФЗФ змінювалися за допомогою величин  $R_\Phi$  і  $C_\Phi$ . Також в експериментах змінювалася частота і шпаруватість маніпуляцій вихідною напругою інвертору, що імітувало релейне регулювання.

Автоколивання в резонансному контурі моделі РПЕ запускалися за допомогою початкового зміщення напруги 1 мВ, яка імітує дію шуму в схемі управління при близькій до нуля зоні нечутливості релейного елементу РЕ. Нижче на рис. 3 наведено приклади графіків перехідних процесів, які ілюструють працездатність та поведінку РПЕ при різних значеннях сигналів регулювання і при наступних умовах регулювання: а – для  $f_\Phi^* = 0.1$  (100 % вихідної напруги); б – для  $f_\Phi^* = 1.0$  (50 % вихідної напруги); в – для  $f_\Phi^* = 10.0$  при релейному регулюванні з частотою 3 КГц і зі шпаруватістю маніпуляцій напругою інвертору рівною 2 (25 % вихідної напруги).

На основі імітаційного моделювання були визначені ряди частот автогенерації при різних значеннях добротності контуру і різних частот полюсів ФЗФ, наведені у вигляді графіків на рис. 4. Дані графіків знімалися при зростанні параметрів елементів ФЗФ, тому вісь абсцис направлена в напрямку зниження частоти налаштування ФЗФ.

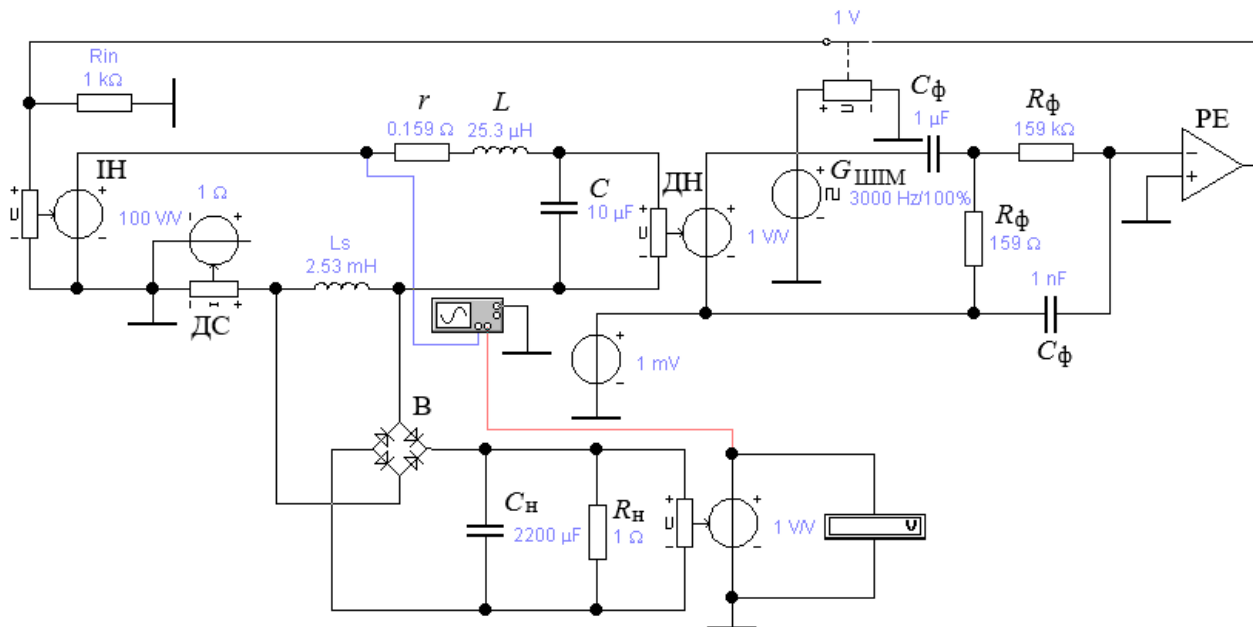


Рисунок 2 – Імітаційна модель РПЕ із автогенерацією

На рис. 4 позначено наступні графіки: 1 і 2 – залежності вихідної напруги РПЕ від частоти налаштування ФЗФ; 3 і 4 – залежності частоти автогенерації від частоти налаштування ФЗФ. Графіки 1 і 3 відповідають опору навантаження  $R_H = 1$  Ом, графіки 2 і 4 – опору навантаження  $R_H = 10$  Ом для добротності контуру РПЕ  $Q = 10$ . Також отримано експериментальні залежності для інших значень добротності контуру РПЕ, що підтверджують правильність теоретичних розрахунків.

Отримані в ході досліджень повні експериментальні дані та сімейства графіків для інших параметрів РПЕ в цій статті не наводяться з причини обмежень і плануються до використання в наступних дослідженнях та будуть опубліковані окремо.

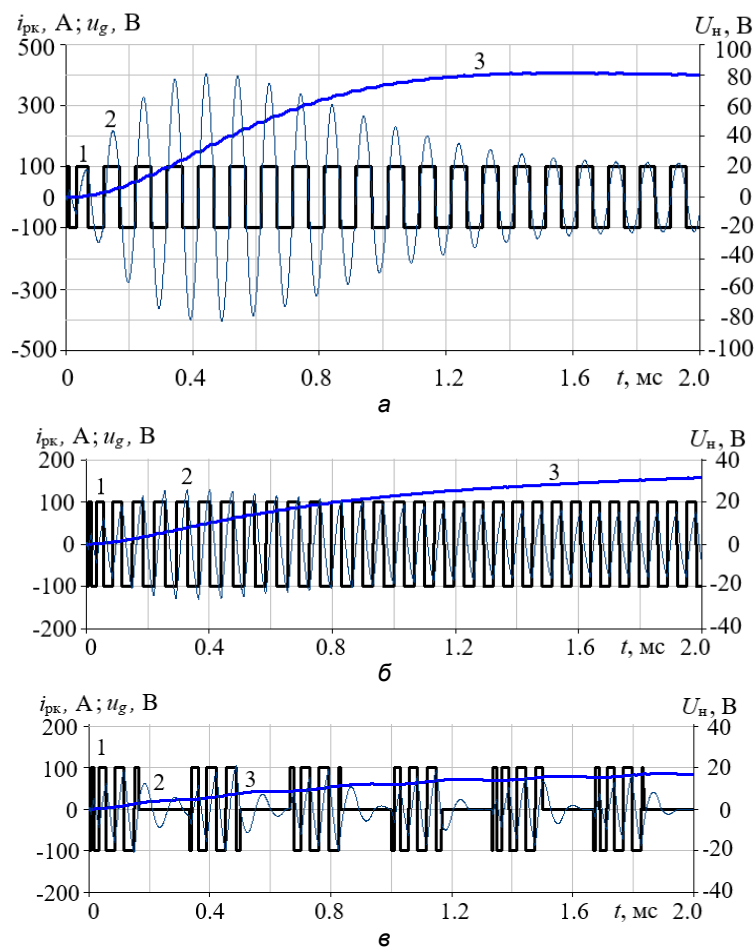


Рисунок 3 – Графіки вихідної напруги інвертору РПЕ  $u_g$  (графіки 1), струму контуру  $i_{pk}$  (графіки 2) і вихідної напруги  $U_n$  (графіки 3)

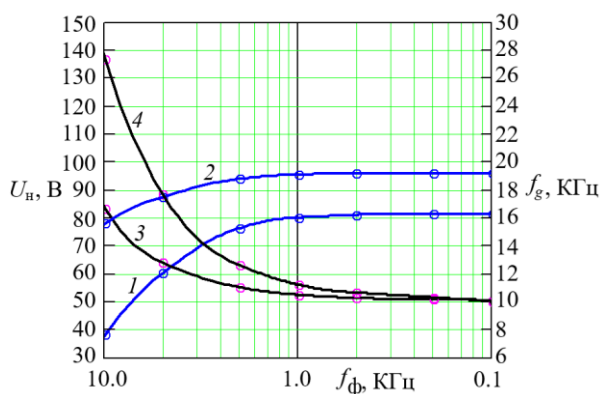


Рисунок 4 – Експериментальні залежності вихідної напруги  $U_n$  і частоти автогенерації  $f_g$  від частоти налаштування ФЗФ  $f_\phi$  для  $Q = 10$

### ОБГОВОРЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Як видно з графіків на рис. 3, графік 1, що відповідає ПЗЗ по напрузі на ємності зі смуговим фільтром і графік 2, що відповідає ПЗЗ по струму контуру з фільтром високих частот і ПЗЗ по напрузі індуктивності з фільтром низьких частот, знаходяться в діапазоні робочих частот вище резонансної частоти. Графік 6, що відповідає ПЗЗ по струму контуру з фільтром низьких частот, знаходиться в діапазоні нижче резонансної частоти. Графіки 3, 4, 5, що відповідають ПЗЗ по струму контуру зі смуговим фільтром при різних коефіцієнтах ширини смуги  $k_{шс} = 1, 10, 100$  відповідно – в діапазоні нижче і вище робочої частоти. Для транзисторного інвертора зі

зворотними паралельними діодами, враховуючи особливості технічної реалізації датчиків і стійкість до імпульсних перешкод, краще використовувати ПЗЗ по напрузі на ємності (графік 1 на рис. 3). Тоді робоча частота при будь-яких параметрах ФЗФ буде більшою за частоту резонансу. Струм контуру РПЕ буде запізнюватися по відношенню до вихідної напруги ІН, що сприяє зменшенню комутаційних втрат потужності в силових транзисторах [1–3]. Для тиристорного інвертора зі зворотними паралельними діодами можна рекомендувати ПЗЗ по струму контуру з фільтром низьких частот (графік 6 на рис. 3), коли робоча частота завжди менша за резонансну частоту і струм контуру випереджатиме по фазі вихідну напругу ІН, що сприятиме природньому закриванню тиристорів при зворотному струмі [4].

Далі розглянемо часові діаграми на рис. 3. При низькій частоті настройки ФЗФ вихідний струм і напруга РПЕ є максимальними. Перехідний процес запуску РПЕ матиме тим більший викид амплітуди коливань струму контуру (рис. 3,а), чим більша добротність контуру. При підвищенні частоти настройки ФЗФ знижуються вихідні величини і знижується викид амплітуди струму контуру в перехідному процесі (рис. 3,б) в абсолютному значенні і відносно до сталої амплітуди. При введенні релейного регулювання на рис. 3,в спостерігаються періодичні перехідні процеси, які при розширенні проміжків генерування можуть накладатися один на одного. Тому можна передбачити, що залежність поточних середніх значень вихідних величин РПЕ при релейному регулюванні не є лінійною, як в нерезонансних широтно-імпульсних перетворювачах. Ця особливість проявляється тим сильніше, чим більша частота маніпуляцій вихідною напругою ІН. Але при зниженні частоти маніпуляцій очікувано зростуть пульсації вихідних величин з цією частотою. Тому регульовальні характеристики РПЕ для релейного регулювання потребують додаткового дослідження.

Експериментальні залежності частоти автогенерації на рис. 4 (графік 4) відповідають теоретичним характеристикам на рис. 3 (графік 1), а залежності вихідної напруги на рис. 4 (наприклад, графік 1) відповідають перехідним процесам (наприклад, графіки 3 на рис. 3), що свідчить про адекватність теоретичних розрахунків та імітаційної моделі РПЕ.

## ВИСНОВКИ

В подальшому доцільно дослідити поведінку РПЕ не тільки при фазово-релейному регулюванні і стабільних параметрах елементів, а і при повільній і при швидкій зміні параметрів резонансних контурів. Також слід порівняти особливості поведінки РПЕ при: частотно-релейному регулюванні; фазово-релейному регулюванні; параметричному регулюванні. Окремий інтерес в розвитку досліджень представляє синтез регуляторів з суміщеним, зокрема фазово-релейним регулюванням вихідних величин.

## Список використаних джерел

1. Oeder C., Barwig M. and Duerbaum T., "Estimation of switching losses in resonant converters based on datasheet information," 2016 18th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'16 ECCE Europe), Karlsruhe, Germany, 2016, pp. 1–9, doi: 10.1109/EPE.2016.7695275.
2. Oeder C., Barwig M. and Duerbaum T., "Novel Method for the Estimation of Switching Losses in Resonant Converters," PCIM Europe 2016; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management, Nuremberg, Germany, 2016, pp. 1–6.
3. Escudero, Manuel & Kutschak, Matteo-Alessandro & Pulsinelli, Francesco & Rodriguez, Noel & Morales, Diego. (2021). On the Practical Evaluation of the Switching Loss in the Secondary Side Rectifiers of LLC Converters. *Energies*. 14. 5915. 10.3390/en14185915.
4. Hubert Piquet, Yvon Chéron, Patrick Kuo-Peng. A complete modelling of the series-resonant converter in ZCS mode. 5th European Conference on Power Electronics and Applications, EPE'93, Sep 1993, Brighton, United Kingdom. hal-02523148.

УДК 621.314

*Ігнатенко Є. В., Костюченко В. І., к.т.н., Новогрецький С. М., к.т.н.*

*Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв*

## КЕРУВАННЯ РЕАКТИВНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ В УМОВАХ НЕСИМЕТРІЇ РЕЖИМУ

На стадії виробництва, передачі, розподілу та споживання електричної енергії (ЕЕ) стоїть задача скорочення втрат, удосконалення якості постачання, точного обліку та створення найкращого режиму споживання. Реальне несиметричне і нелінійне активно-реактивне навантаження в точці підключення (ТПі) до електротехнічної системи

споживає активну потужність і неактивну складову повної потужності (ПП). Споживання ЕЕ неактивних складових для більшості таких навантажень обумовлено технологічними причинами та забезпечує нормальний довгостроковий характер режиму роботи неідеального навантаження. Неактивні складові повної потужності призводять до додаткових втрат в електромережі, тим самим погіршуючи якість електропостачання. Несиметричне навантаження призводить не тільки до додаткових втрат в мережі і підвищеним вимогам до джерела електроенергії, але і до пульсацій потоку електроенергії, несиметрії напруги живлення, до несиметричних режимів.

Ефективним способом вирішення задачі скорочення втрат та підвищення точності обліку ЕЕ виступає застосування компенсуючих пристроїв (КП) і точних засобів обліку ЕЕ. Засоби обліку ЕЕ вимірюють активну потужність (обумовлену симетрією чисто активного навантаження) і реактивну потужність (обумовлену симетрією реактивних елементів навантаження). Проте неактивна складова ПП, яка обумовлена несиметрією активно-реактивного навантаження, не вимірюється і не враховується засобами обліку, та завдає електропостачанню великої шкоди у порівнянні із стандартною реактивною потужністю. Встановлення КП в точці підключення неідеального (реального) навантаження забезпечує компенсацію всіх неактивних складових ПП навантаження. Вимірювання, компенсація та облік складових ПП тісно пов'язані між собою, доповнюють одна одну та з різних позицій допомагають вирішити проблему ефективного споживання ЕЕ. Ці задачі повинні вирішуватися в рамках загальної теорії потужності і бути єдиним комплексним підходом в умовах небажаного порушення симетрії напруги.

Кількість споживачів з нелінійним та несиметричним навантаженням, що погіршують якість споживання електроенергії, постійно зростає. Зростає і кількість навантажень з підвищеними вимогами до якості постачання електроенергії. У цих ускладнюючих умовах споживання та постачання енергопостачальні організації (постачальники ЕЕ) повинні забезпечити кожного споживача електроенергією необхідної якості.

Відповідно до ДСТУ EN 50160:2023, як несинусоїдальні спотворення обумовлені сумарними нелінійними навантаженнями споживачів, так і несиметрія напруги обумовлена несиметричним навантаженням споживачів [1]. Крім погіршення якості електроенергії, несиметричне навантаження призводить до втрат у ланцюгах постачальника, які можуть перевищувати втрати від реактивної потужності. Так, сумарне навантаження окремих підприємств містить 85...90 % несиметричного навантаження. Проте витрата енергії на несиметрію навантаження (активно-реактивну) йде «мимо лічильника» – споживач її не оплачує. Ця енергія завдає шкоди і електропостачальній організації (перевантажуючи його мережі) та обладнання інших споживачів (викликаючи несиметрію напруги).

Проблема несиметричного споживача не нова, багатопланова і включає організаційні, наукові, технічні та економічні заходи щодо зниження несиметрії навантаження [2–4]. Можна виділити такі заходи щодо зменшення додаткових втрат споживання енергії від несиметричного навантаження:

- превентивні заходи щодо симетризації навантаження;
- політика диференційованого розрахунку за показаннями вимірювальних лічильників за споживану енергію;
- політика встановлення вимірювальних лічильників та компенсаційних пристроїв.

**Метою роботи** є підвищення енергоефективності електротехнічного комплексу завдяки використанню гібридного компенсатора реактивної потужності.

В наш час існує низка пристроїв для компенсації неактивних складових повної потужності, які в свою чергу можна схематично поділити на активні, пасивні і гібридні. Найбільш ефективними в даний час в мережах 0,4 кВ у порівнянні з пасивними компенсаторами є застосування активних компенсуючих пристроїв, робота яких у складі електротехнічних комплексів дозволяє забезпечити плавність регулювання величини реактивної потужності і при цьому не генерувати до мережі струми вищих гармонік.

Використання активних компенсаторів реактивної потужності не завжди є економічно вигідно, пасивні компенсатори не відповідають сучасним вимогам щодо плавності регулювання та швидкості керування величиною реактивної потужності та/або можуть взагалі погіршувати спектральний склад струму мережі живлення. Задача підвищення коефіцієнту потужності електротехнічних комплексів залишається актуальною. При створенні сучасних пристроїв компенсації реактивної потужності необхідно не лише підвищити їх ефективність, але і зменшити собівартість.

Проаналізувавши методи і способи підвищення енергоефективності електротехнічного комплексу, пропонується використання гібридного компенсатора реактивної потужності, у якому вдосконалено алгоритм вибору параметрів пасивної частини, знижено встановлену потужність активної частини, а також застосована «ізоляція» пасивної частини компенсатора від вищих гармонік.

На рис. 1 показано узагальнену схему гібридного компенсатора реактивної потужності з нелінійним навантаженням.

Активна частина гібридного компенсатора представляє собою автономний інвертор напруги, побудований на базі 3-фазного транзисторного моста з конденсатором у ланці постійного струму.

Пасивна частина гібридного компенсатора представляє собою батарею конденсаторів з ступінчастим перемиканням за допомогою з'єднаних зустрічно-паралельно тиристорів.

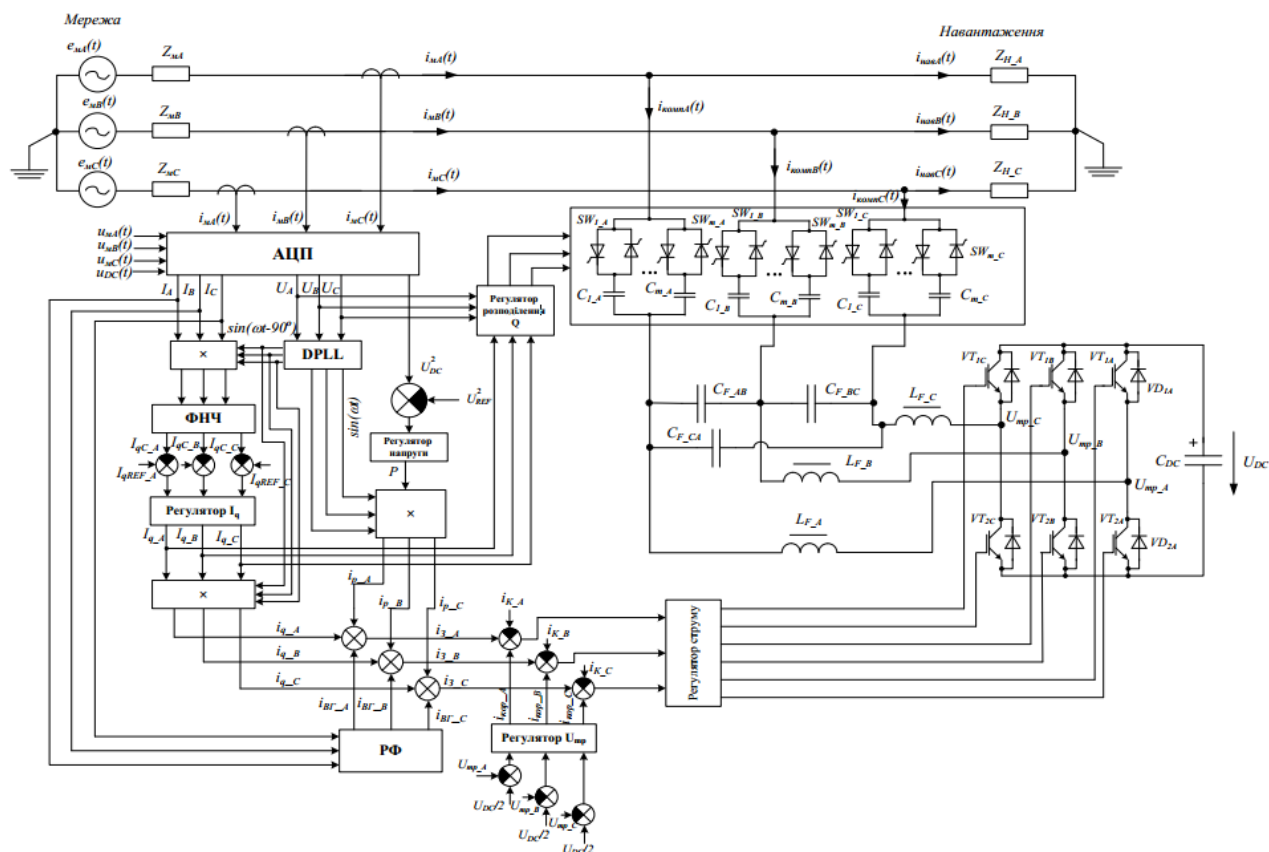


Рисунок 1 – Схема силової частини гібридного компенсатора реактивної потужності

Структурна схема системи керування гібридного компенсатора реактивної потужності в режимі роботи з синусоїдальними струмами показана на рис. 2. Частота дискретизації АЦП  $f_{\text{виб}} = 6,4$  кГц. Струм завдання  $i_s(z)$  визначається як сума синфазного  $i_p(z)$  і квадратурного  $i_q(z)$  струму.

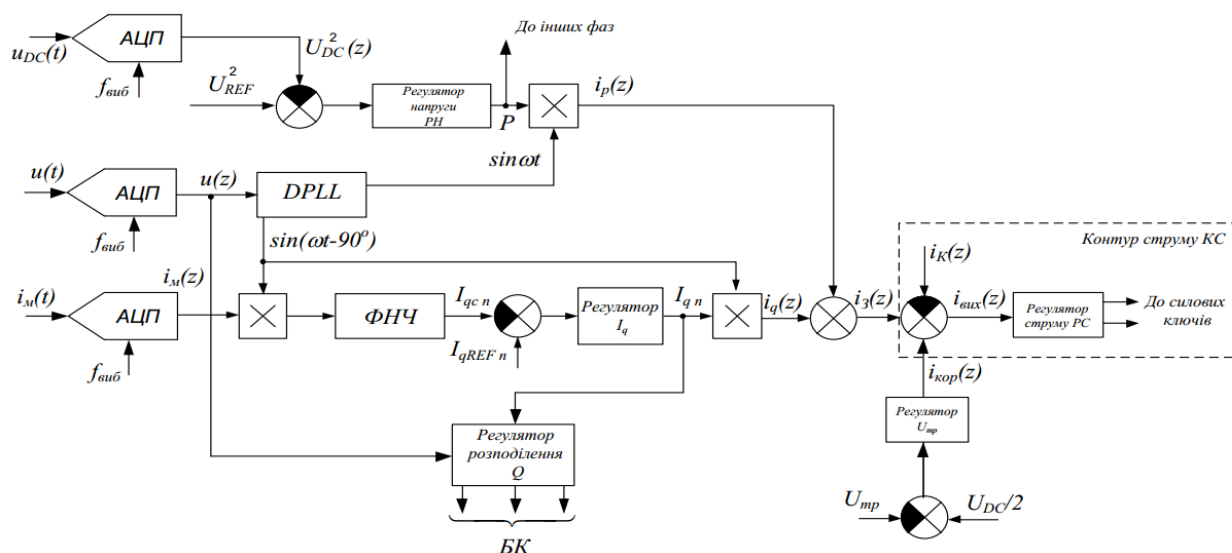


Рисунок 2 – Структурна схема системи керування гібридного компенсатора реактивної потужності

На рис. 3 показані результати моделювання роботи гібридного компенсатора реактивної потужності для 4-провідної схеми підключення до мережі.

Для випадку нелінійного споживача (реактивна складова струму утворюється несиметричним активно-індуктивним навантаженням) (рис. 4). Результати імітаційного моделювання при роботі в умовах несиметричної мережі показані на рис. 5.

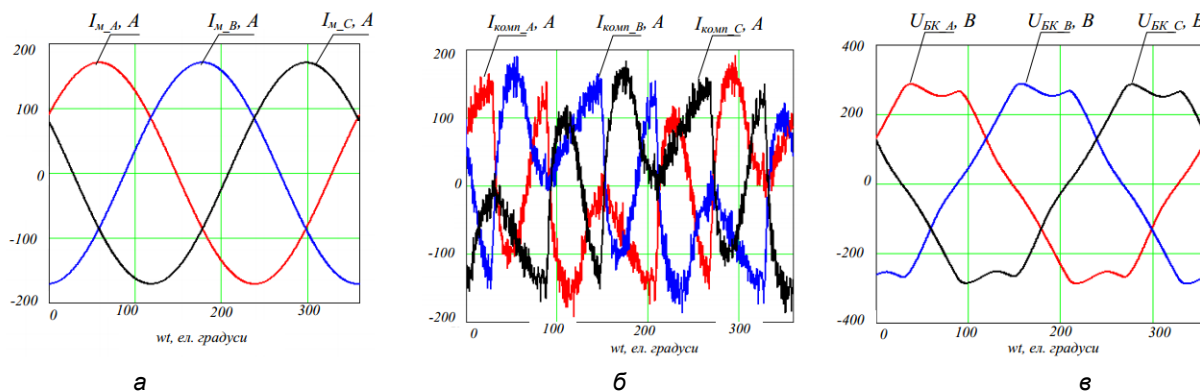


Рисунок 3 – Результати математичного моделювання:  
а – струм мережі; б – струм компенсатора; в – напруга на батареї конденсаторів

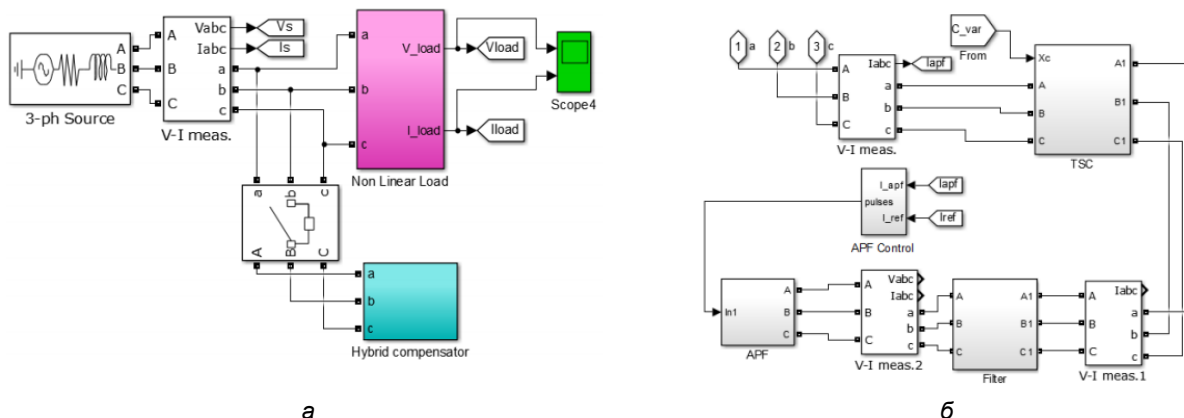


Рисунок 4 – Імітаційна модель:  
а – загальний вигляд; б – підсистема «гібридний компенсатор»

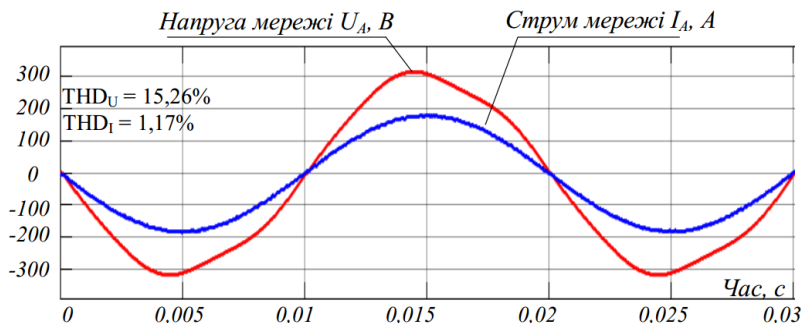


Рисунок 5 – Результати моделювання несиметричної мережі

**Висновки.** Встановлення гібридного компенсатора реактивної потужності дозволяє значно зменшити встановлену потужність інвертора активної частини, проте потребує розробки алгоритму керування для ефективного перерозподілу потужностей між пасивною та активною частинами.

#### Список використаних джерел

1. ДСТУ EN 50160:2023 Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності (EN 50160:2022, IDT).
2. Рогальський Б.С. Компенсація реактивної потужності. Методи розрахунку, способи та технічні засоби управління. Ч. 1 / Рогальський Б.С. – Вінниця : ВДТУ, 2002. – 119 с.
3. Способи та технічні засоби керування компенсуючими установками нового технічного рівня / Б.С. Рогальський, В.М. Непийвода, П.В. Сосенко, С.І. Вознюк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2001. – № 3. – С. 62–70.
4. Червінська Т.М. Аналіз впливу батарей статичних конденсаторів на роботу системи електропостачання з несиметричною напругою / Л.Б. Терешкевич, Т.М. Червінська // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2010. – № 2. – С. 39–43.

УДК 621.3:519.876.5:621.745.56

Іванов А. В., к.т.н., Честних М. В., PhD Eng.

Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України

## РЕГУЛЮВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СИЛОВОЇ ТА ГІДРОДИНАМІЧНОЇ ДІЇ НА РОЗПЛАВ ШЛЯХОМ ЗМІНИ ГЕОМЕТРІЇ ЕЛЕКТРОДНОЇ СИСТЕМИ ПРИ ЕЛЕКТРОСТРУМОВІЙ ОБРОБЦІ РОЗПЛАВУ

Отримання виливків з покращеними показниками структури та властивостей є однією з найважливіших проблем ливарного виробництва. Для вирішення цієї проблеми активно використовуються енергетичні методи обробки, принцип дії яких заснований на впливі на розплав зовнішніми фізичними полями [1–5]. Одним із таких методів є кондукційна електрострумova обробка (КЕСО). Принцип КЕСО, це безпосереднє пропускання електричного струму через метал, що оброблюється за допомогою електродів. Цей метод добре зарекомендував себе як ефективний гнучкий інструмент для впливу на результат кристалізації. Дослідження перетворення енергії електромагнітного поля струму в теплову, енергію руху рідини, хвильову і т. д. при такій обробці, а також ефективне регулювання обробкою [1, 3, 4, 6, 7] є складною, нетривіальною та актуальною науково-практичною задачею. Це пов'язано з тим, що фізичні поля, які генеруються у рідкому металі та процеси, що при цьому відбуваються є мультифізичними та багатомасштабними. Тому, щоб розробити принципи та алгоритми регулювання процесами при КЕСО розплавів, скоротити енерго- та матеріальні ресурси на фізичні експерименти широко використовують методи математичного моделювання. Нажаль, на даний час реалізувати наскрізну повну математичну модель електрострумовой обробки неможливо. Ефективною показала себе методика декомпозиції проблеми на складові, вивчення та встановлення взаємозв'язків конкретного перетворення енергії або низки перетворень та супутніх процесів первинного електромагнітного поля струму в, наприклад, теплову енергію та термічні процеси в розплаві. Слід зазначити, що метод є мультиваріантним [8], тобто головними факторами, які визначають ефективність впливу є не тільки сила або амплітуда струму, його частота, скважність і т. д., але й конфігурація та параметри технологічного реактора (ТР). Ключовим елементом ТР є електродна система (ЕС). Одними з найпоширеніших ТР є такі, що komponуються ЕС з паралельним розташуванням двох електродів. Вони є досить простими та технологічними у використанні. Але, в наслідок того, що варіативність їх виконання дуже велика, не має чітких систематизованих уявлень про вплив ЕС такого типу на розподіл та характеристики силового та пов'язаного з ним гідродинамічного впливу на металеві розплави.

Тому **мета** даної роботи: дослідити та обґрунтувати можливості регулювання характеристик електромагнітної силової та гідродинамічної дії на розплав шляхом зміни геометрії електродної системи.

**Постановка задачі.** Геометрична постановка задачі подібна роботі [9]. Циліндрична ємність об'ємом ( $V$ ) заповнена розплавом силуміну поширеного у ливарному виробництві силуміну А356, стінки та дно якої не є електропровідними (рис. 1).

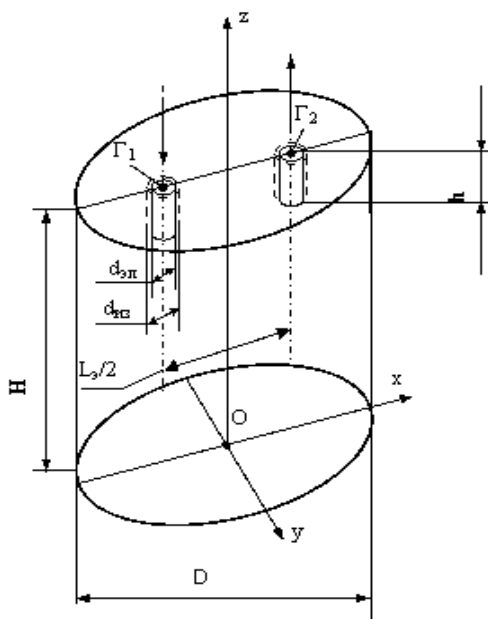


Рисунок 1 – Геометрична модель задачі

Висота ємності ( $H$ ), діаметр ( $D$ ). Електроди 1 і 2 розташовуються паралельно один до одного на відстані ( $L_e$ ) між їх центрами. Електроди виготовлені з титану діаметром ( $d_{el}$ ) та занурені на глибину ( $h$ ). Бічна поверхня електродів покрита високотемпературною електроізоляцією діаметром ( $d_{iz}$ ).

Геометричні розміри:  $H = 100$  мм;  $D = 100$  мм;  $L_e/2 = 50$  мм;  $d_{el} = 5$  мм;  $d_{iz} = 6$  мм. Глибина  $h$  варіювалася від 10 до 90 мм для кожного електрода. Струм в розплав підводився через перетини Г1 та Г2.

На рис. 2 представлено спектр найчастотніших у використанні типів ЕС з двома паралельними електродами.

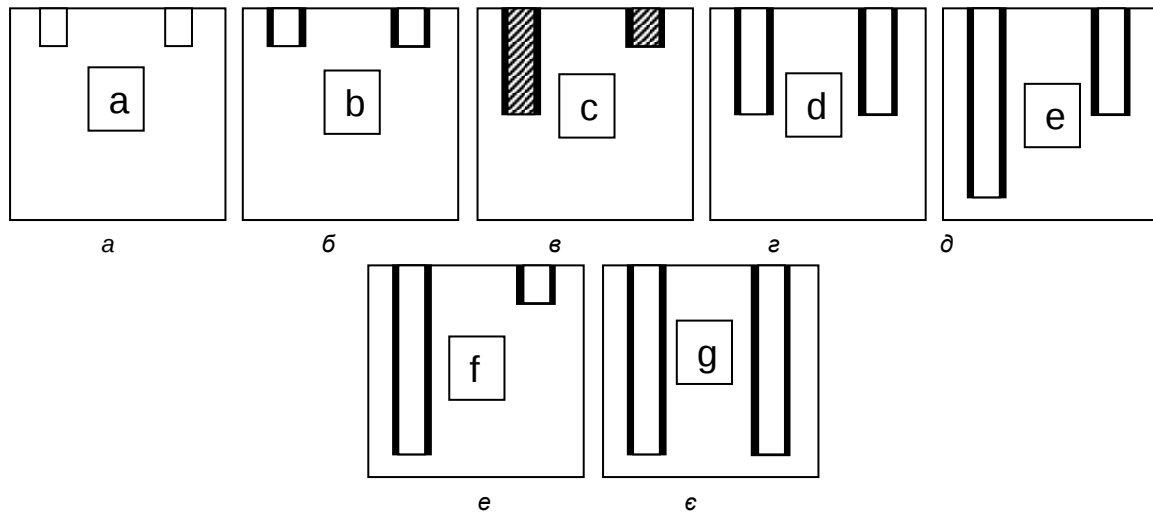


Рисунок 2 – Типи електродних систем:

$a$  – система з неізолюваними електродами, заглибленими на 10 мм ( $a$ );  $b$  – система з електродами із ізолюваною бічною поверхнею, заглибленими на 10 мм ( $b$ );  $c$  – система з електродами із ізолюваною бічною поверхнею, заглибленими на 50 мм та 10 мм ( $c$ );  $d$  – система з електродами із ізолюваною бічною поверхнею, заглибленими на 50 мм ( $d$ );  $e$  – система з електродами із ізолюваною бічною поверхнею, заглибленими на 90 мм і 50 мм ( $e$ );  $f$  – система з електродами із ізолюваною бічною поверхнею, заглибленими на 90 мм та 10 мм ( $f$ );  $g$  – система з електродами із ізолюваною бічною поверхнею, заглибленими на 90 мм ( $g$ )

Розглянемо випадок квазістаціонарного гармонійного електромагнітного поля, для якого система рівнянь Максвелла має вид:

$$\left. \begin{aligned} \nabla \times \tilde{H} &= \tilde{J} = \epsilon (\tilde{E} + \mathbf{v} \times \tilde{B}) + \tilde{J}^e, \\ \nabla \times \tilde{E} &= -j\omega \tilde{B}, \\ \nabla \cdot \tilde{B} &= 0, \\ \nabla \cdot \tilde{D} &= 0. \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

де  $\nabla$  – оператор Набла;

$\tilde{H}$  – комплексна амплітуда напруженості магнітного поля у розплаві, А/м;

$\tilde{J}$  – комплексна амплітуда густини струму, А/м<sup>2</sup>;

$\sigma$  – питома електрична провідність, См/м;

$\tilde{E}$  – комплексна амплітуда напруженості електричного поля, В/м;

$\mathbf{v}$  – швидкість розплаву, м/с;

$\tilde{B}$  – комплексна амплітуда індукції магнітного поля, Тл;

$\tilde{J}^e$  – комплексна амплітуда густини струмів, А/м<sup>2</sup>;

$\tilde{D}$  – комплексна амплітуда електричної індукції, Кл/м.

Об'ємна електромагнітна сила визначається як

$$\mathbf{F}_{em} = \frac{1}{2} \nabla (\tilde{J} \times \tilde{B}). \quad (2)$$

Гідродинамічне поле в рідкометалевому провіднику моделювалось шляхом чисельного розв'язку рівняння Нав'є–Стокса для в'язкої нестисливої рідини при  $\nabla \cdot \mathbf{v} = 0$ :

$$\frac{d\mathbf{v}}{dt} = -(\mathbf{v} \cdot \nabla)\mathbf{v} + \gamma \Delta \mathbf{v} - \frac{1}{\rho} \nabla P + \frac{\mathbf{F}_{em}}{\rho}, \quad (3)$$

де  $\mathbf{F}_{em}$  – об'ємна електромагнітна сила, Н/м<sup>3</sup>;  
 $\Delta$  – оператор Лапласа;  
 $\gamma$  – коефіцієнт кінематичної в'язкості, м<sup>2</sup>/с;  
 $\rho$  – густина розплаву, кг/м<sup>3</sup>;  
 $\mathbf{v}$  – швидкість розплаву, м/с;  
 $P$  – тиск, Па.

Для спрощення розрахункових процедур на даному етапі для моделювання ЕМП частоту струму прийmemo 50 Гц, розв'язання рівняння Нав'є–Стокса проведемо для стаціонарного режиму з відповідними початковими та граничними умовами [4, 8, 9–12] у безіндукційному приближенні за умови, що рух розплаву буде виникати тільки внаслідок дії об'ємної електромагнітної сили.

Для дослідження характеристик силового навантаження та гідродинамічних збурень будемо розглядати вісім критеріїв, а саме:

- відносна максимальна об'ємна електромагнітна сила у об'ємі розплаву  $F_{max}$ ;
- відносна максимальна швидкість у об'ємі розплаву  $v_{max}$ ;
- коефіцієнт середньої електромагнітної сили ( $\bar{F}$ ), який показує рівномірність розподілу електромагнітних сил у розплаві та визначається як:

$$\bar{F} = \frac{\iiint_V |\mathbf{F}_{em}| dV}{F_{max} \cdot V}; \quad (4)$$

– коефіцієнт середньоквадратичної електромагнітної сили ( $F_{rms}$ ) характеризує розподіл потужності електромагнітного збудження в об'ємі, його значення визначається формулою:

$$F_{rms} = \frac{\sqrt{\frac{1}{V} \iiint_V |\mathbf{F}_{em}|^2 dV}}{F_{max}}; \quad (5)$$

– відносний коефіцієнт інтенсивності електромагнітних сил ( $F_{var}$ ), що є інтегральним показником ступеня контрастності розподілу електромагнітних сил, визначається співвідношенням:

$$F_{var} = \frac{F_{rms}}{\bar{F}}; \quad (6)$$

- коефіцієнт середньої швидкості ( $\bar{v}$ ) відображає залученість об'єму до руху та визначається як:

$$\bar{v} = \frac{\iiint_V |\mathbf{v}| dV}{v_{max} \cdot V}; \quad (7)$$

– коефіцієнт середньоквадратичної швидкості ( $v_{rms}$ ) характеризує розподілену кінетичну енергію потоку, відображаючи, наскільки значна частина об'єму залучена до руху відносно максимальної швидкості та визначається формулою:

$$v_{rms} = \frac{\sqrt{\frac{1}{V} \iiint_V |\mathbf{v}|^2 dV}}{v_{max}}; \quad (8)$$

– відносний коефіцієнт енергетичної неоднорідності ( $v_{rms}$ ) характеризує ступінь неоднорідності розподілу швидкостей у потоці та визначається як:

$$v_{var} = \frac{v_{rms}}{\bar{v}}. \quad (9)$$

**Результати чисельних експериментів та обговорення.** Необхідність впровадження критеріїв, які характеризують вплив на об'єм розплаву, що обробляється, є сучасною тенденцією, тому що аналіз багатьох

варіантів розрахунку, особливо в 3D є складною нетривіальною задачею. Для прикладу наведемо приклади розрахунків ЕМП (рис. 3), які автори зробили у роботі [9].

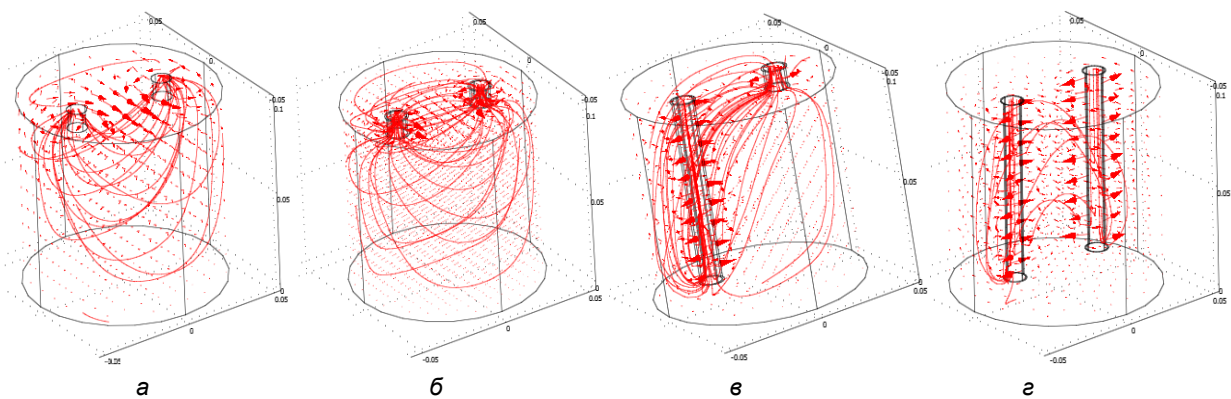


Рисунок 3 – Розподіл електричного та магнітного поля в електродних системах різних типів при частоті струму 50 Гц (стрілки – магнітне поле, лінії – електричне поле) [9]:

а – електродна система а; б – електродна система б; в – електродна система в;  
г – електродна система г (див. рис. 2)

На рис. 4 наведено відповідні результати моделювання полів швидкостей течій для відповідних електродних систем.

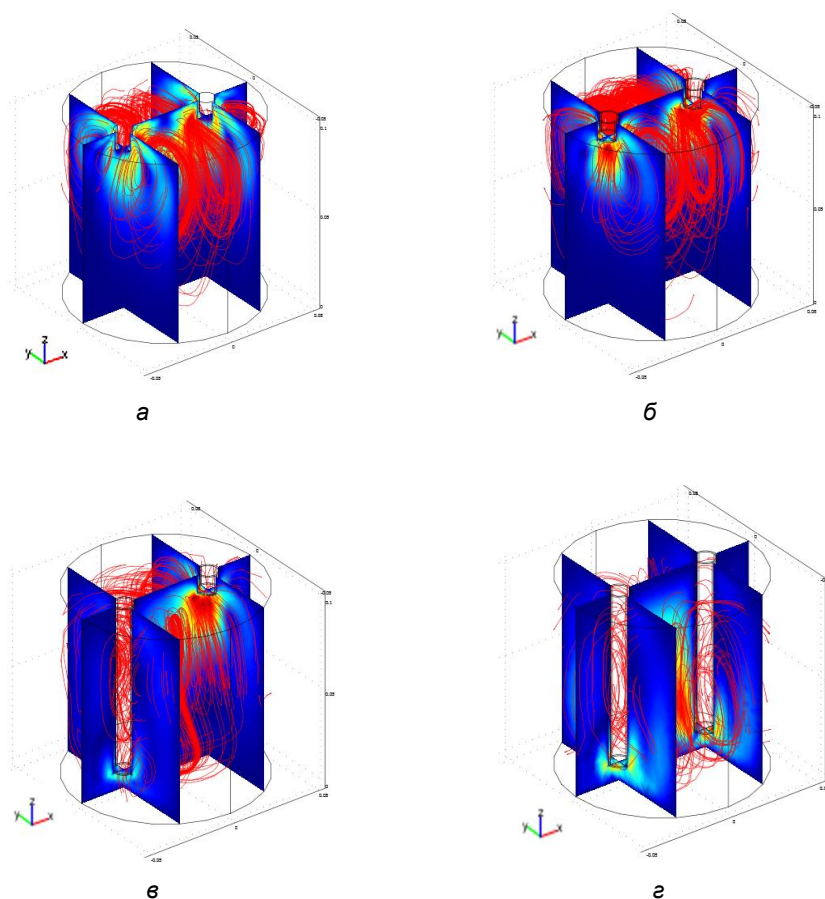


Рисунок 4 – Розподіл гідродинамічного поля (кольорова гама) та ліній потоку течій розплаву (лінії) для різних типів електродних систем (див. рис. 2):

а – електродна система а; б – електродна система б; в – електродна система в; г – електродна система г

З наведених на рис. 3 та рис. 4 розподілів фізичних полів можна зробити первісний якісний аналіз силового впливу та реакції рідкометалевої середовища. Наприклад, наочно можна спостерігати, що системи а, б, г мають більш рівномірний розподіл електричного та магнітного поля ніж у електродній системі в. Характер течій теж бачиться

більш рівномірним, а в системі g навпаки є ярко виражені суттєво нерівномірні вихрові структури. Але числовий аналіз результатів, їх інтерпретація стосовно характеру і інтенсивності складних вихрових структур, що наведені на рис. 3 та рис. 4, як зазначалось раніше, є дуже складною задачею. Тому запропонований нами інноваційний підхід для досліджень процесів при КЕСО розплавів шляхом впровадження інтегральних критеріїв є доцільним, перспективним та відповідає сучасним тенденціям [14–16].

В таблиці наведено відносні значення критеріїв оцінки силового та гідродинамічного впливу при КЕСО.

Таблиця – Числові значення критеріїв для оцінки силового та гідродинамічного впливу на розплав

| Тип ЕС | $v_{max}$ | $F_{max}$ | $\bar{F}$ | $F_{rms}$ | $F_{var}$ | $\bar{v}$ | $v_{rms}$ | $v_{var}$ |
|--------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| a      | 0,36      | 0,78      | 0,43      | 1,00      | 1,00      | 0,85      | 1,00      | 1,00      |
| b      | 1,00      | 0,88      | 0,42      | 0,93      | 0,96      | 0,59      | 0,27      | 0,52      |
| c      | 0,95      | 1,00      | 0,44      | 0,75      | 0,74      | 0,77      | 0,52      | 0,73      |
| d      | 0,90      | 0,91      | 0,54      | 0,80      | 0,64      | 0,97      | 0,83      | 0,91      |
| e      | 0,98      | 0,93      | 0,67      | 0,88      | 0,57      | 0,84      | 0,76      | 0,87      |
| f      | 0,98      | 0,82      | 0,71      | 1,00      | 0,61      | 0,64      | 0,47      | 0,68      |
| j      | 0,54      | 0,66      | 1         | 0,93      | 0,40      | 1,00      | 0,78      | 0,88      |

Представлені відносні значення  $F_{max}$  та  $v_{max}$  для типів електродних систем a-g показують важливу, але не завжди очевидну закономірність, що підвищенні значення сили не гарантує найбільшого гідродинамічного відклику рідкометалевої рідини. Наприклад, типи електродних систем b, c, d, e, f характеризуються відносними значеннями  $F_{max}$  від 0,8 до 1, але лише режими b, e та f демонструють відповідно високі швидкості  $v_{max}$ . Це доводить, що ефективність перетворення енергії електромагнітного поля в енергію руху залежить від розподілу ЕМП в об'ємі розплаву, а не тільки від її локального максимуму. Таким чином, показники  $F_{max}$  та  $v_{max}$  треба аналізувати комплексно, можливо навіть у якості співвідношення  $v_{max}/F_{max}$ , що може давати нам експрес інформацію щодо інтенсивності перемішування та ефективності перетворення енергії ЕМП в енергію руху. Однак цих даних не достатньо для дослідження відмінностей у структурі вихорів течій та зон дисипації.

Аналіз критеріїв показує наступне:

Електродна система a має низький показник  $F_{max}$ , значення  $F_{rms}$  та  $F_{var}$ , які дорівнюють одиниці демонструють майже практичну однорідність. Значення  $v_{rms}=1$  та  $v_{var}=1$  свідчать про те, що потік працює у стабільному ламінарному режимі з повним охопленням об'єму. Але  $v_{max}=0,36$  є найнижчими серед досліджуваних електродних систем. Тобто така система реалізує слабкий силовий вплив та може застосовуватись лише у задачах з низькими вимогами до інтенсивності перемішування.

Електродна система b має найвищу відносну швидкість  $U_{max}=1$  при  $F_{max}\approx 0,88$ , що означає найкращий гідродинамічний ККД, коли відносно стандартна сила створює максимально можливу швидкість. Водночас невисоке значення  $\bar{F}$  та водночас  $F_{var}\approx 0,96$  вказують на високу, хоч і не ідеальну рівномірність силового поля. Швидкісні критерії показують низькі значення. Тобто потік має потужні вихрові складові, але охоплює лише невелику частину об'єму у верхній частині ємності з розплавом. Ідеально підходить для інтенсивної обробки поверхневих зон розплаву.

Електродна система c характеризується максимальним  $F_{max}$  серед електродних систем при  $v_{max}=0,95$ . Силове поле має значення  $F_{var}=0,74$ . Це означає, що просторовий розподіл швидкостей течій викликає значні нерівномірності. Швидкісні коефіцієнти  $\bar{v}=0,77$  та  $v_{rms}\approx 0,5$  свідчать про те, що течія є змішаною, тобто частина об'єму інтенсивно перемішується, але присутні й великі «тихі» зони. Це режим частково вихрових коливань, які можуть бути корисні для локальної обробки, але не забезпечують повного перемішування.

Електродна система d характеризується середніми показниками  $\bar{F}$  та  $F_{var}$ . Критерій  $\bar{v}=0,97$ , а  $v_{var}$  та  $v_{rms}$  дорівнюють приблизно 0,9. Це дає змогу характеризувати гідродинамічне поле як одне з найбільш рівномірних. Це збалансований режим, у якому об'єм розплаву активно перемішується з мінімальною локалізацією сили або швидкості. Така електродна система найбільш придатна для вирівнювання температури чи концентрації елементів по об'єму без надмірних нелінійних навантажень.

Електродна система e має досить високе значення  $\bar{F}$  при високому  $F_{rms}$ . Це свідчить про те, що об'єм рідкометалевої рідини збуджується більш рівномірно у порівнянні з системами c або d, але менш рівномірно ніж при використанні електродної системи a. Швидкісні показники  $\bar{v}$  та  $v_{rms}$  показують розвинену структуру вихорів та суттєве охоплення об'єму. Потік збалансований і здатний проникати у глибину розплаву. Така геометрія електродів добре підходить для гомогенізації розплаву перед розливанням.

Електродна система f вирізняється найбільшим  $F_{rms}=1$ , що означає максимальні пікові коливання сили при високому середньому навантаженні ( $\bar{F}=0,71$ ). Це створює складну, багатовихрову структуру потоків з великими градієнтами швидкостей течій. Показник  $v_{max}=0,98$ , що практично найвищим значенням, середня швидкість

$\bar{v}=0,64$ , а  $v_{var}=0,68$  вказує на значну нелінійність течій. Ця електродна система створює найбільш дисипативний режим КЕСО. Така конфігурація найкраща для глибинної обробки об'єму розплаву. Створює сильні дисипативні течії, ефективно впливає на структурні складові розплаву та евтектику. У технологічному сенсі це найдоцільнішою конфігурацією електродної системи для модифікування структури та підвищення кристалізаційної здатності розплаву.

Електродна система  $g$  має найнижчий  $F_{max}=0,662$ , при  $\bar{F}=1$  має максимальну середню силу  $\bar{F}=1$ . При цьому  $F_{var}=0,4$ , тобто силове поле майже повністю рівномірне, але занадто слабе для створення суттєвого руху. Це підтверджується низьким  $v_{max}=0,54$ , хоч середня швидкість тут найбільша серед усіх  $\bar{v}=1$ . Потік є плавним, повільним, рівномірним, майже без вихрових зон. Режим гідравлічно пасивний і не підходить для активної обробки розплаву та може бути ефективно використаний для довготривалого рівномірного прогріву та стабілізації розплаву.

Таким чином, результати моделювання дали змогу зробити повний порівняльний аналіз силового та гідродинамічного впливів на розплав при використанні двоелектродних систем з паралельно розташованими електродами. Запропоновано критерії для оцінки рівномірності, інтенсивності та структури силового та гідродинамічного полів. Показано відмінності між режимами та подано фізичне тлумачення отриманих результатів.

**Висновки.** Методами математичного моделювання досліджено можливості регулювання характеристик силової та гідродинамічної дії на розплав шляхом зміни геометрії двоелектродних систем з паралельними електродами. Результати моделювання показали, що рух розплаву алюмінієвого сплаву (А356) під дією електромагнітних навіть у рамках стаціонарної ламінарної моделі виникають локальні рециркуляційні зони. Виявлення цих зон проводилося не лише візуально через карти швидкостей і векторів потоку, а й кількісно за допомогою запропонованих в роботі критеріїв рівномірності розподілу швидкостей та величини діючих сил. Аналіз електродних систем дав змогу виявляти локальні області з підвищеною дисипацією енергії, де можливе більш інтенсивне руйнування меж фаз і складових евтектики, що впливає на показники структури матеріалу. У той же час, регіони з більш рівномірним потоком характеризуються сприятливими умовами для гомогенізації розплаву після збурень. Розроблено засади кількісного оцінювання впливів на розплав при кондукційній електрострумовій обробці, що може стати важливим інструментом для прогнозування якості кінцевого продукту.

#### Список використаних джерел

1. Balasubramani N., Xu Y., Zhang Y., Zhai Q. et al. Investigating the grain refinement mechanisms of pulsed electric current, ultrasonic and melt stirring solidification of pure aluminium // JOM. – 2021. – Vol. 73. – P. 3873–3885. DOI: 10.1007/s11837-021-04904-7.
2. Wang G., Dargusch M., Easton M., St. John D. Treatment by External Fields // In: Lumley R. N. (Ed.). Fundamentals of Aluminium Metallurgy. – Sawston: Woodhead Publishing, 2018. P. 279–332.
3. Balasubramani N., Venezuela J., St. John D., Wang G., Dargusch M. A review of the origin of equiaxed grains during solidification under mechanical stirring, vibration, electromagnetic, electric-current, and ultrasonic treatments // Journal of Materials Science & Technology. – 2023. – Vol. 144. – P. 243–267. DOI: 10.1016/j.jmst.2022.09.067.
4. Eskin D. G., Jiawei M. Solidification processing of metallic alloys under external fields. – Cham: Springer, 2018. – 320 p. DOI: 10.1007/978-3-319-94842-3.
5. Nuradinov A., Nogovitsyn A., Nuradinov I., Zubenina N., Sirenko K. Innovative ways to control the process of forming the crystal structure of metal alloys // Science & Innovation. – 2020. – No. 4. – P. 67–78. DOI: 10.15407/scine16.04.067.
6. Choi J. S., La M., Kim D. E., Choe K.-H., Hyun S.-K., Kim M.-J. Effect of electric current on the microstructural refinement of pure aluminum // Journal of Materials Research and Technology. – 2021. – Vol. 12. – P. 818–828. DOI: 10.1016/j.jmrt.2021.03.040.
7. Liang C.-L., Lin K.-L. The microstructure and property variations of metals induced by electric current treatment: A review // Materials Characterization. – 2018. – Vol. 145. – P. 545–557. DOI: 10.1016/j.matchar.2018.08.058.
8. Tsurkin V. M., Ivanov A. V., Zaporozhets Yu. M., Zhdanov O. O., Chestnykh M. V. Multivariant method of conductive electric current treatment of molten metal // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. – 2024. – Vol. 60. – P. 31–39. DOI: 10.3103/S1068375524010150.
9. Ivanov A. V., Chestnykh M. V. Three-dimensional modeling of electromagnetic field distribution and force action characteristics during conductive electric current treatment of melts in frequency modes // Electromechanical and Energy Saving Systems. – 2024. – No. 2. – P. 8–16. DOI: 10.32782/2072-2052.2024.2.65.1.
10. Zhang Y. H., Xu Y. Y., Ye C. Y. et al. Relevance of electrical current distribution to the forced flow and grain refinement in solidified Al-Si hypoeutectic alloy // Scientific Reports. – 2018. – No. 1. Article 3242. DOI: 10.1038/s41598-018-21709-y.

11. Rübiger D., Zhang Y., Galindo V., Franke S. et al. Experimental study on directional solidification of Al-Si alloys under the influence of electric currents // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 143. Article 012021. DOI: 10.1088/1757-899X/143/1/012021.
12. Meunier G. The finite element method for electromagnetic modeling. – London: ISTE Ltd, 2008. – 606 p.
13. Ivanov A. V., Tsurkin V. N. Peculiarities of distribution of electromagnetic and hydrodynamic fields for conductive electric current treatment of melts in different modes // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. – 2019. – No. 1. – P. 53–63. DOI: 10.3103/S1068375519010101.
14. Zielińska M., Yang H., Madej Ł., Malinowski Ł. Development and validation of computational fluid dynamics model of ladle furnace with electromagnetic stirring system // Materials. – 2024. – No. 4. – Article 960.
15. Xu G., Tan R., Song B., Liu W., Yang S., Zuo X., Huang Y. Numerical simulation of the effect of solidified shell conductivity and billet sizes on the magnetic field with final electromagnetic stirring in continuous casting // Materials. – 2023. – No. 13. – Article 4765.
16. Jaime R. F., Puga H., Prokic M. et al. Fundamentals of ultrasonic treatment of aluminum alloys // International Journal of Metalcasting. – 2024. – Vol. 18. – P. 2783–2801. DOI: 10.1007/s40962-023-01253-w.

**УДК 681.5:004.8**

*Сіриченко С. О., Герасін О. С., к.т.н.*

*Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв*

## **СИСТЕМИ КОМП'ЮТЕРНОГО ЗОРУ У СФЕРІ РОБОТОТЕХНІКИ**

Сфера розвитку нейронних мереж і штучного інтелекту наразі стрімко зростає, формуючи нові підходи до автоматизації та оптимізації процесів. Сучасні інтелектуальні системи здатні істотно прискорювати діяльність людини, беручи на себе рутинні та повторювані завдання, цим дозволяючи науковцям та розробникам зосередитись на більш складних темах. Нейронні мережі стали інноваційним напрямом, що забезпечує автоматизацію інтелектуальних операцій через моделювання принципів роботи нейронних зв'язків людського мозку.

Одним із ключових напрямів сфери нейронних мереж є комп'ютерний зір. Це підгалузь штучного інтелекту, що дозволяє обробляти та інтерпретувати візуальну інформацію майже на рівні людського сприйняття. Оскільки зір є найважливішим органом чуття людини, здатність машин працювати з візуальними даними відкриває нові можливості для створення адаптивних та автономних систем.

Особливе значення має інтеграція комп'ютерного зору з робототехнічними системами. Поєднання алгоритмів візуального сприйняття та роботизованих платформ дозволяє машинам реагувати на зміни середовища в реальному часі, приймати обґрунтовані рішення та виконувати дії з високим ступенем автономності. Це суттєво розширює потенціал автоматизації і визначає подальший розвиток сучасних інтелектуальних технологій.

**Метою роботи** є всебічне дослідження ролі комп'ютерного зору у роботизованих системах шляхом аналізу сфер його застосування, технічних засобів реалізації та основних методів обробки візуальних даних.

Рівень автономності робототехнічних систем з машинним зором може відрізнятися залежно від їх функціонального призначення та вимог до безпеки. Для опису ступеня залученості оператора використовують три підходи: HITL (Human-in-the-loop), HOTL (Human-on-the-loop), HOOTL (Human-out-of-the-loop) [1]. Вони визначають міру самостійності роботи у прийнятті рішень.

У випадку HITL людина повністю відповідає за керування робототехнічною системою, а комп'ютерний зір надає необхідні для прийняття рішень дані. Нейронні мережі можуть виявляти та класифікувати об'єкти, будувати тривимірні карти, аналізувати сцену, проте всі подальші дії виконує оператор. У таких роботах машинний зір виконує роль сенсора та інструмента аналітики, підтримуючи оператора, але не забезпечуючи автономність. Прикладом є розвідувальні дрони, які застосовуються у військовій сфері, а також у рятувальних операціях та наукових дослідженнях.

Підхід HOTL характеризується частковою автономністю: система здатна самостійно виконувати завдання та приймати локальні рішення, проте оператор може втручатися у процес виконання або змінювати сценарій роботи у разі потреби. Прикладом можуть бути марсоходи, які працюють автономно через велику затримку між командами з Землі та виконанням завдань. У військовому застосуванні – FPV- або дрони дальнього польоту, можуть використовувати комп'ютерний зір для донаведення в умовах впливу РЕБ [2].

Реалізація HOOTL передбачає повну автономність робототехнічної системи. Людина не бере участі ані в процесі керування, ані в ухваленні рішень під час виконання завдання. Головні функції контролю та планування виконують інтелектуальні алгоритми (нейронні мережі, системи штучного інтелекту), які на основі даних комп'ютерного зору аналізують ситуацію та самостійно визначають подальші дії. Прикладами таких систем можуть бути роботи для взаємодії з людиною, промислові роботи для роботи з продукцією, автономні автомобілі (наприклад, Tesla), космічні апарати, що самостійно визначають оптимальне місце приземлення та змінюють траєкторію [3], а також інтелектуальні моделі на базі Transformer-технологій, такі як PaLM-E [4].

Робототехнічні системи з комп'ютерним зором можуть застосовуватись в різних галузях для автоматизації діяльності людини. Проте їхнє впровадження часто є громіздким, дорогим та складним в реалізації. Наразі, в більшості, розвиток комп'ютерного зору перебуває на стадії досліджень та тестування, проте використання цих систем в інтеграції з робототехнікою залишається перспективним напрямом, над яким варто продовжувати працювати.

У робототехнічних системах вибір засобів збору даних визначається характером поставленої задачі, оскільки саме сенсори забезпечують первинне сприйняття навколишнього середовища та формують інформаційну основу для подальшого аналізу. Найпростішим рішенням є монокулярні камери, які дають двовимірне зображення сцени. Попри відсутність прямої інформації про глибину, такі системи залишаються поширеними завдяки конструктивній простоті та низькій вартості.

Складніші завдання потребують точнішого просторового моделювання, тому широкого застосування набули стерео-камери, що дають змогу відтворювати глибину сцени за принципом бінокулярного зору людини. Подібні системи забезпечують надійне визначення відстаней у режимі реального часу та є важливими для мобільних роботів і безпілотних платформ, які працюють у динамічних середовищах.

Окрім стереозору використовуються різні типи камер глибини, що формують тривимірне представлення середовища, зокрема ToF (Time-of-Flight), structured light та LiDAR сенсори.

Звичайні монокулярні камери забезпечують детальну інформацію про об'єкти, включно з текстурами та кольорами, і відрізняються низькою вартістю, проте мають обмежене поле зору, залежать від освітлення та не дають прямої інформації про відстань. LiDAR і камери глибини дозволяють точно визначати позицію й працювати в умовах низької освітленості, але генерують складні дані, не захоплюють дрібні текстури, не ефективні в умовах туману, дощу й снігу та є дорогими [5].

У промислових застосуваннях значну роль відіграють гіперспектральні камери, здатні реєструвати дані не лише в діапазоні видимого світла, а й у ширших спектральних областях. Це відкриває можливості для аналізу стану рослинності, ідентифікації матеріалів, виявлення дефектів конструкцій та дослідження хімічних властивостей об'єктів. Подібні сенсори використовують у сільському господарстві для оцінки здоров'я культур, в промисловості для контролю якості продукції, в пошуково-рятувальних операціях та військовій сфері.

Окремою перспективною технологією є камери подій, які не формують повні кадри, а реєструють лише зміни інтенсивності світла на рівні окремих пікселів. Такий принцип роботи забезпечує мінімальне енергоспоживання, надзвичайно високу частоту оновлення та низькі затримки, що є критично важливим для роботизованих платформ, що працюють в реальному часі. Крім цього ці камери зберігають ефективність у ситуаціях з сильними контрастами освітленості, з якими не можуть впоратись звичайні камери.

Різноманіття вибору оптичних сенсорів дозволяє роботизованим платформам отримувати комплексні та інформативні дані про навколишнє середовище. Водночас у екстремальних умовах, такими як висока запиленість, туман, дим, мутність води та низька освітленість, зорові системи можуть замінюватись або інтегруватись з іншими сенсорами (наприклад радарними).

Від вибору пристрою збору візуальних даних залежать точність, складність та ефективність роботи системи комп'ютерного зору. Після отримання зображення наступним етапом є його обробка та аналіз. У роботизованих системах комп'ютерного зору для обробки та аналізу інформації застосовуються різноманітні алгоритми та методи, що забезпечують реалізацію ключових функцій, таких як ідентифікація об'єктів, оцінка відстаней, відстежування та побудова тривимірних моделей середовища. Конкретний вибір алгоритмів визначається складністю завдання, доступними сенсорами та умовами експлуатації.

Найпоширенішою операцією в роботизованих систем комп'ютерного зору є відстежування об'єктів (object tracking). Його поділяють на два типи: SOT (Single Object Tracking) – відстежування одного об'єкта, та MOT (Multiple Object Tracking) – відстежування множини об'єктів. SOT застосовується при роботі з конкретним об'єктом і є простішим у реалізації, тоді як MOT передбачає одночасне відстежування великої кількості об'єктів і реагування відповідно до їх положення або руху (прикладом є автономні автомобілі, де необхідно враховувати переміщення інших транспортних засобів, пішоходів, дорожні знаки, розмітки, а також передбачувані й непередбачувані перешкоди).

Під час відстеження об'єкта виникає багато труднощів, пов'язаних зі зміною зовнішніх умов та характеристик самого об'єкта. Освітлення в області цілі може різко змінюватись, що ускладнює стабільне розпізнавання. Фон поблизу часто має подібний колір або текстуру, через що алгоритм може плутати об'єкт з оточенням. Ситуація ще більше ускладнюється коли зображення має низьку роздільну здатність і містить недостатню кількість пікселів для точного аналізу. До цього додається зміна масштабу, коли реальний розмір об'єкту в кадрі помітно відрізняється від початкового, також під час руху об'єкт змінює положення форму та орієнтацію, а швидкі переміщення призводять до великих зміщень між кадрами, що ускладнює його стабільне відстеження. Серйозною проблемою також є оклюзія – коли ціль частково або повністю перекривається іншими об'єктами [6].

Окрім SOT та MOT, методи відстеження об'єктів можна класифікувати як показано на рис. 1.

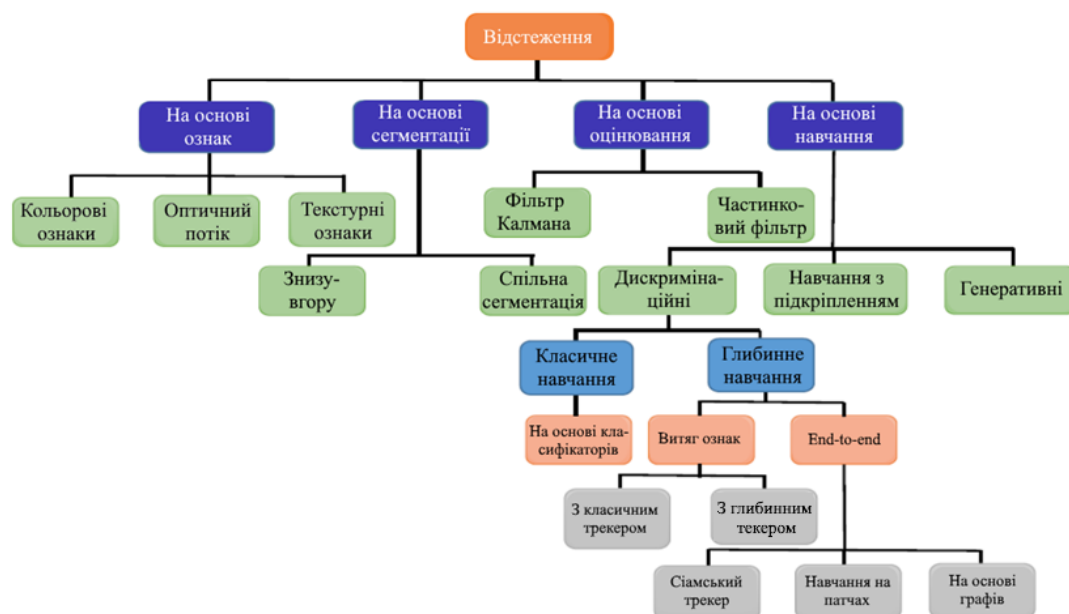


Рисунок 1 – Класифікація методів відстеження [6]

Методи на основі ознак є одним із базових підходів до відстежування об'єктів у послідовностях кадрів. Вони полягають у виділенні унікальних ознак об'єктів, таких як колір, текстура або оптичний потік, та пошуку найбільш схожого об'єкта у наступних кадрах за допомогою цих ознак. Колірні ознаки відображають зовнішній вигляд об'єкта, текстурні ознаки описують повторювані структурні візерунки, а оптичний потік дозволяє оцінювати видимий рух об'єктів між кадрами. Хоча ці методи прості й ефективні для базового відстежування, вони потребують виділення унікальних та надійних ознак для точного розпізнавання цілі серед інших об'єктів.

Зазвичай відстеження відбувається за виділеним bounding-box об'єкта, однак такий підхід не дозволяє системі точно визначати межі об'єкта та може плутати його з фоном. У задачах робототехніки часто буває важливо знати точну форму об'єкта, й саме для цього використовується сегментація, яка виділяє об'єкт на рівні пікселів. Знизу-вгору (Bottom-up) підхід виконує сегментацію та відстеження як дві окремі послідовні задачі: спочатку виділяється передній план, а потім ці області відстежуються, що призводить до накопичення помилок сегментації. На відміну від цього, joint-based методи поєднують сегментацію та трекінг у єдину модель, де ці процеси працюють одночасно й взаємно коригують один одного, що дозволяє зменшити помилки та забезпечити більш стабільне відстеження в динамічних сценах.

Методи, засновані на оцінюванні, розглядають відстеження як задачу оцінки стану об'єкта, де його положення та рух описуються вектором стану, що описує його положення та швидкість. Байєсівські фільтри дозволяють безперервно оновлювати положення об'єкта на основі даних і складаються з двох кроків: передбачення та оновлення. Фільтр Калмана застосовується для лінійних систем та дозволяє прогнозувати положення об'єкта та коригувати його за новими вимірюваннями. Для нелінійних задач використовуються фільтри частинок, які представляють розподіл станів набором частинок з вагами, виконуючи рекурсивні кроки передбачення та оновлення, і таким чином забезпечують точніше відстеження при складних рухах та шумних спостереженнях.

Методи на основі навчання вивчають зовнішній вигляд цілі та її зміни між кадрами під час тренування, а потім використовують ці знання для виявлення й відстеження об'єктів у нових відео. До таких методів належать методи з підкріпленням, дискримінаційні підходи та генеративні підходи.

Дискримінаційні трекери розглядають відстеження як задачу класифікації – модель навчається розрізняти ціль від фону. Розрізняють класичне (shallow learning) та глибинне (deep learning) навчання. У класичних методах використовуються заздалегідь визначені людьми ознаки (колір, текстура тощо), а класифікація виконується за

допомогою таких алгоритмів, як SVM, Random Forest або Decision Tree. На відміну від цього, deep learning автоматично витягує ознаки за допомогою глибоких нейромереж. Частина методів використовує глибокі мережі лише для отримання ознак, поєднуючи їх з класичними трекарами на кшталт KCF, Kalman Filter або LSTM, а інші реалізують повністю навчальні підходи.

End-to-end методи навчають одну мережу виконувати і виділення ознак, і оцінювання кандидатів. До них належать сіамські трекари (Siamese tracker), методи навчання на патчах (Patch learning tracker) та графові трекари (Graph-based tracker). Сіамські мережі порівнюють ознаки цілі та області пошуку, визначаючи схожість між кадрами (приклад GOTURN). У навчанні за патчами (фрагментами) модель навчається на позитивних і негативних вибірках з попереднього кадру, а позиція цілі визначається найбільшою відповіддю моделі (приклад MDNet). Графові трекари, такі як TCNN (Temporal Convolutional Neural Network), представляють відображення цілі у вигляді дерева CNN-мереж, де кожна гілка відповідає певній моделі, а остаточний стан цілі оцінюється за зваженим рішенням кількох моделей.

Генеративні методи моделюють зовнішній вигляд цілі, намагаючись максимально точно відтворити її дані. Під час роботи такі моделі оновлюються в реальному часі, адаптуючись до змін об'єкта та переважно ігноруючи фон. Відстеження здійснюється шляхом пошуку регіонів, що найкраще відповідають змодельованому вигляду цілі.

У навчанні з підкріпленням трекари розглядаються як агент, що навчається обирати оптимальні дії через взаємодію з відеопотоком. Такі моделі містять мережу зіставлення (matching network), яка формує карту оцінок можливого положення об'єкта, та мережу прийняття рішень (policy network), що обирає найкращий варіант. Положення цілі визначається за точкою з найвищою оцінкою на карті, а мережа прийняття рішень навчається працювати в різних сценаріях [6].

Перелічені підходи та методи можуть використовуватись як для SOT так й для MOT, але MOT є більш складнішою задачею та потребує використання додаткових алгоритмів. Після визначення об'єктів у кадрі наступним кроком є зіставлення цих об'єктів між послідовними кадрами. Для цього кожній виявленій рамці присвоюється унікальний ідентифікатор, що має зберігатись на наступних кадрах. Асоціація нових детекцій з вже вистеженими об'єктами базується на різних критеріях: схожість позиції, зміна розмірів та форми рамок, приналежність до класу об'єкта, перекриття рамок, а також відстань між глибинними ознаками. Використання лише евклідової відстані між центрами рамок часто призводить до помилкових зіставлень, тому сучасні системи комбінують декілька метрик для більш надійного визначення відповідності.

Для прогнозування руху об'єктів у часі застосовують фільтри Калмана та їхні 3D-версії для систем із глибинними сенсорами або LiDAR. Вони дозволяють не тільки реагувати на поточні вимірювання, а й передбачати майбутнє положення об'єкта, що особливо корисно при частковій оклюзії.

Сучасні підходи, такі як спільне виявлення та відстеження (joint detection and tracking), інтегрують детекцію та відстеження в єдину модель. Це дозволяє системі одночасно визначати об'єкти та відстежувати їхні ідентифікатори (ID), зменшуючи накопичення помилок і підвищуючи точність у динамічних умовах [7].

Новим революційним етапом розвитку комп'ютерного зору, який може суттєво змінити підходи до автоматизації та робототехніки, стали зорові трансформери (Vision Transformer, ViT). Традиційне застосування глибокого навчання переважно базувалося на згорткових нейронних мережах, проте поява моделей-трансформерів на основі комп'ютерного зору відкрила новий підхід, що використовує механізм самоуваги (self-attention) для обробки зображень і врахування глобальних залежностей. У комп'ютерному зорі ViT перевершили CNN у завданнях класифікації та стимулювали розвиток методів для виявлення об'єктів, сегментації та розуміння сцени.

Спочатку розроблені для обробки природної мови, трансформери були адаптовані для завдань зору, що дозволило використовувати їх здатність моделювати довготривалі залежності на кадрах та ефективніше захоплювати контекстну інформацію порівняно з традиційними згортковими нейромережами.

У робототехніці зорові трансформери покращують сприйняття та контроль роботів. Вони використовуються для автономної навігації, планування траєкторій, візуальної одометрії та маніпуляцій, підвищуючи точність і надійність роботи в складних середовищах. Також ViT застосовуються у взаємодії людина–робот, допомагаючи розпізнавати жести, вирази обличчя та активності, що робить взаємодію більш природною та інтуїтивною [8].

Архітектурно ViT відрізняється від традиційних CNN (рис. 2). Зображення розбивається на фіксовані за розміром фрагменти (patches), кожен з яких лінійно вбудовується. До отриманих векторів додаються позиційні вкладення (embeddings), після чого сформована послідовність подається до стандартного кодувальника трансформера. Для виконання класифікації використовується типовий підхід: до послідовності додається додатковий класифікаційний CLS-токен, що навчається, стан якого на виході моделі слугує підсумком для прогнозу.

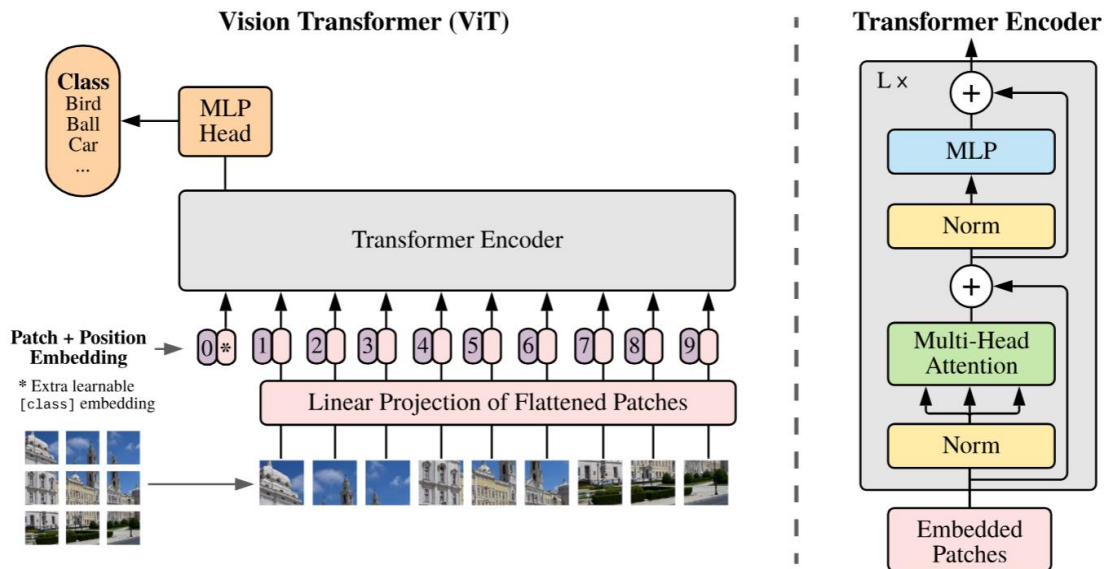


Рисунок 2 – Архітектури зорового трансформера (Vision Transformer) та кодувальника трансформера (Transformer Encoder) [9]

Стандартний трансформер отримує на вхід одновимірну послідовність векторів токена. Для обробки двовимірних зображень  $x \in R^{H \times W \times C}$  модель перетворює зображення у послідовність 2D-фрагментів  $x_p \in R^{N \times (P^2 \times C)}$ , де  $H \times W$  – розділова здатність оригінального зображення,  $C$  – кількість каналів,  $(P, P)$  – розділова здатність кожного фрагменту, а  $N = HW/P^2$  – кількість фрагментів. Трансформер використовує постійний розмір латентного вектора  $D$  у всіх шарах, тому фрагменти перетворюються у векторний вигляд та відображаються у  $D$ -вимірному просторі за допомогою навчальної лінійної проєкції (1). Результат цієї проєкції називається вкладеннями фрагментів (patch embeddings).

$$z_0 = [x_{class}; x_p^1 E; x_p^2 E; \dots; x_p^N E] + E_{pos}, E \in R^{(P^2 \times C) \times D}, E_{pos} \in R^{(N+1) \times D}. \quad (1)$$

Навчальне вкладення додається на початок послідовності вбудованих фрагментів ( $z_0^0 = x_{class}$ ), стан якого на виході кодувальника трансформера (енкодер,  $z_L^0$ ) слугує представленням зображення у (2). Як під час попереднього тренування, так і під час донавчання, до  $z_L^0$  приєднується кінцевий блок (head) для класифікації. Він реалізується як MLP (Multilayer Perceptron) з одним прихованим шаром на етапі попереднього тренування та з одним лінійним шаром на етапі донавчання.

$$y = LN(z_L^0). \quad (2)$$

До вкладень фрагментів додаються позиційні вкладення для збереження інформації про позиції. Використовуються стандартні навчальні одновимірні позиційні вкладення, оскільки при використанні більш складних двовимірних позиційних вкладень не спостерігається значного підвищення продуктивності. Отримана послідовність векторів слугує входом для енкодера.

Кодувальник трансформера містить чергування шарів MSA (Multi-headed Self-attention) та блоків MLP (2, 3). LN (LayerNorm) застосовується перед кожним блоком, а зв'язок обходу (residual connection) – після кожного блоку. MLP містить два шари функції активації GELU (Gaussian Error Linear Unit).

$$z'_l = MSA(LN(z_{l-1})) + z_{l-1}, l = 1 \dots L. \quad (3)$$

$$z_l = MLP(LN(z'_l)) + z'_l, l = 1 \dots L. \quad (4)$$

Незважаючи на свої переваги, інтеграція трансформерів на основі зору в робототехнічні системи має низку проблем. До них належать високі обчислювальні вимоги та потреба у великих наборах даних [10].

**Висновки.** Сучасні роботизовані системи комп'ютерного зору, поєднуючи різні алгоритми та сенсорні дані, здатні виконувати складні задачі автономної навігації, аналізу сцени, трекінгу та побудови точних моделей середовища. Це критично для промисловості, військової сфери, рятувальних операцій і космічних місій. Основні

переваги включають автоматизацію процесів, високу точність і повторюваність, перспективність розвитку завдяки інтеграції з глибинним навчанням і трансформерів, можливість роботи у небезпечних умовах, а також масштабованість і гнучкість застосувань.

Попри значні переваги, системи комп'ютерного зору залишаються дорогими у розробці та інтеграції, вимагають складних алгоритмів і високої кваліфікації. Їх ефективність залежить від умов середовища і може знижуватися в тумані, димі чи поганому освітленні. Такі системи потребують потужних обчислювальних ресурсів і мають обмежену універсальність у різних середовищах.

#### Список використаних джерел

1. Malatji M. Augmented Intelligence Framework for Human–Artificial Intelligence Teaming in Cybersecurity / Masike Malatji // Human-Centric Intelligent Systems. – 2025. – Vol. 5. – P. 151–180. – DOI: 10.1007/s44230-025-00103-8.
2. Коломійцев О.В., Комаров В.О. Особливості використання штучного інтелекту в безпілотних авіаційних комплексах різного типу та призначення // Впровадження інноваційних технологій та модернізація технічної складової сектору безпеки і оборони як вагомий чинник у боротьбі з агресором : зб. матеріалів міжвідомчої науково-практичної конференції, 27 березня 2024 р., Київ / відп. ред. Парфило О. А. – Київ : ICTE СБУ, 2024. – С. 84–89. – ISBN 978-617-8013-62-2.
3. NASA JPL. Terrain Relative Navigation [Електронний ресурс] // Mars 2020 Rover. – Режим доступу: <https://robotics.jpl.nasa.gov/what-we-do/flight-projects/mars-2020-rover/terrain-relative-navigation/>
4. Driess D., Xia F., Sajjadi M.S.M., Lynch C., Chowdhery A., Ichter B., Wahid A., Tompson J., Vuong Q., Yu T., Huang W., Chebotar Y., Sermanet P., Duckworth D., Levine S., Vanhoucke V., Hausman K., Toussaint M., Greff K., Zeng A., Mordatch I., Florence P. PaLM-E: An Embodied Multimodal Language Model [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://palm-e.github.io/>
5. Manzoor S., Joo S.-H., Kim E.-J., Bae S.-H., In G.-G., Pyo J.-W., Kuc T.-Y. 3D Recognition Based on Sensor Modalities for Robotic Systems: A Survey // Sensors. – 2021. – Vol. 21. – № 7120. – Режим доступу: <https://doi.org/10.3390/s21217120>
6. Soleimanitaleba Z., Keyvanrada M.A. Single Object Tracking: A Survey of Methods, Datasets, and Evaluation Metrics. – arXiv preprint arXiv:2201.13066, 2022.
7. A complete overview of Object Tracking Algorithms in Computer Vision & Self-Driving Cars [Електронний ресурс] / Computer Vision. – 21.01.2025. – Режим доступу: <https://www.thinkautonomous.ai/blog/object-tracking/>
8. Gupta A., Aggarwal M., Khetan D., Mishra K. Vision-based Transformers Survey for Robotics / A. Gupta, M. Aggarwal, D. Khetan, K. Mishra. – 26 Aug. 2024. – [Preprint]. – Режим доступу: [https://d197for5662m48.cloudfront.net/documents/publicationstatus/219376/preprint\\_pdf/cd582428db1e98f7bed33759d02d7b54.pdf](https://d197for5662m48.cloudfront.net/documents/publicationstatus/219376/preprint_pdf/cd582428db1e98f7bed33759d02d7b54.pdf)
9. Dosovitskiy A., Beyer L., Kolesnikov A., Weissenborn D., Zhai X., Unterthiner T., Dehghani M., Minderer M., Heigold G., Gelly S. et al. An image is worth 16x16 words: Transformers for image recognition at scale – 2020. – [Preprint]. – Режим доступу: <https://arxiv.org/abs/2010.11929>.
10. Robotko S., Topalov A., Susak O., Gerasin O. Enabling Cloud-based Data Analysis for Analog Metal Detectors Using Microcomputer Systems. The 14th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT'2024). University of South Bohemia in České Budějovice, pp. 670–673. DOI: 10.1109/ACIT62333.2024.10712463.

УДК 621.3:681.5

*Сироватка А. В., аспірант*

*Науковий керівник Черно О. О., д.т.н.*

*Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв*

## ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО РЕЗОНАНСНОГО ПРИВОДА У ВІБРАЦІЙНИХ МАШИНАХ ДЛЯ РІЗНОЧАСТОТНОГО УЩІЛЬНЕННЯ БЕТОННИХ СУМІШЕЙ

З різних способів ущільнення бетонної суміші найбільшого поширення набула вібрація [1–3]. На заводах збірного залізобетону вироби зазвичай формують на спеціальних віброплощадках, монолітний бетон в конструкціях ущільнюють глибинними і поверхневими вібраторами.

Інтенсивність ущільнення залежить від амплітуди і частоти вібрації, а також від складу суміші, зокрема розміру фракцій [4]. Для ущільнення крупних фракцій доцільно застосовувати вібрацію низької частоти, а дрібних – більш високої [5, 6]. Тому, один зі шляхів підвищення якості бетонних виробів полягає у застосуванні різночастотного вібрування бетонних сумішей, тобто у послідовному переході з низької до більш високої частоти [7].

Різночастотне вібрування зазвичай реалізується за допомогою дебалансних вібраторів з частотно-регульованим електроприводом [5]. Але на частотах порядку 100 Гц і вище істотно проявляється головний недолік дебалансного привода – малий робочий ресурс внаслідок інтенсивного зношення механіки. З цієї точки зору, значну перевагу має електромагнітний вібраційний привод [8, 9]. Але, для його ефективного використання необхідно, щоб він працював у режимі, близькому до резонансного [10, 11]. Тому, актуальною задачею є створення наукової основи та інженерних рішень щодо забезпечення резонансних режимів роботи електромагнітних вібраційних приводів на різних частотах вібрації.

**Метою роботи** є визначення шляху створення вібраційних машин з керованим електромагнітним приводом, які забезпечують збереження резонансного режиму роботи при послідовній зміні частоти коливань під час вібрування бетонної суміші.

В роботах [12–14] для ефективного використання електромагнітного привода при різночастотному вібруванні запропоновано застосування пристроїв з регульованою жорсткістю, зокрема, керованих динамічних віброгасників з нелінійними пружними елементами – конічними пружинами. Запропонований у [13] вібраційний пристрій містить: робочий орган; електромагнітний вібратор; проміжну масу; встановлений на проміжній масі керований динамічний віброгасник з конічними пружинами; транзисторний перетворювач з ШІМ, що живить обмотки електромагнітного вібратора; систему керування вібратором та віброгасником; датчик струму обмоток вібратора; акселерометр. Пристрій працює наступним чином. За допомогою акселерометра і датчика струму визначається амплітуда коливань робочого органа та їх фаза відносно електромагнітної сили, що використовується для керування амплітудою та частотою струму в обмотці вібратора, забезпечуючи коливання із заданою амплітудою на резонансній частоті. При необхідності зміни частоти вібрації приводиться до руху прес віброгасника, який змінює величину початкового стискання конічних пружин, змінюючи їх жорсткість і, відповідно, резонансну частоту системи. Реагуючи на це, система керування частотою змінює частоту вимушених коливань, налаштовуючись на новий резонанс. Таким чином, відбувається керування амплітудою та частотою вібрації при збереженні енергоефективного резонансного режиму роботи.

Але, розглянутий пристрій має суттєві недоліки:

- складність конструкції керованого віброгасника з пресом для стискання конічних пружин;
- високий рівень акустичного шуму низької частоти, обумовлений взаємодією витків конічних пружин.

З іншого боку, якщо немає необхідності плавної зміни частоти вібрації в певному діапазоні, а достатньо послідовно застосовувати лише 2 частоти, то резонансну частоту пристрою можна змінювати дискретно, перемиканням з більш низької до більш високої величини.

Для цього пропонується застосовувати коливальну систему з можливістю з'єднання двох рухомих мас під час вібрування за допомогою притискного електромагніта. Схема коливальної системи наведена на рис. 1.

Система працює наступним чином. На початковій стадії ущільнення бетонної суміші вібратор створює коливання низької частоти, що є близькою до частоти резонансу при роз'єднаних масах  $m_{21}$  і  $m_{22}$ . На кінцевій стадії за допомогою притискного електромагніта маси  $m_{21}$  і  $m_{22}$  з'єднуються і рухаються як суцільне тіло. Це призводить до підвищення резонансної частоти системи. Водночас вібратор переходить на нову частоту, що відповідає новому резонансу.

**Висновки.** Один з перспективних шляхів ефективного використання електромагнітного вібраційного привода в системах різночастотного вібрування бетонних сумішей полягає у забезпеченні резонансного режиму роботи на різних частотах шляхом дискретного перемикання резонансної частоти за допомогою притискного електромагніта. Для реалізації такої системи необхідно розв'язати ряд наукових та практичних задач:

- моделювання перехідних процесів перемикання резонансних частот з урахуванням особливостей електромагнітних, електромеханічних та механічних процесів;
- визначення параметрів коливальної системи, що забезпечуватимуть ефективну роботу вібраційного привода при заданих значеннях нижньої та верхньої частот вібрації;
- створення системи автоматичного керування електромагнітним вібратором та притискним електромагнітом, що забезпечуватиме їх ефективну сумісну роботу.

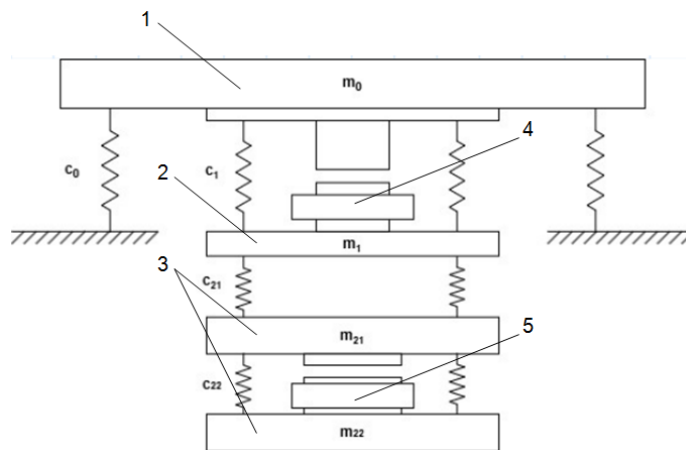


Рисунок 1 – Схема коливальної системи вібраційної машини з дискретним перемиканням резонансної частоти:

1 – маса робочого органа; 2 – проміжна маса; 3 – резонансні маси; 4 – електромагнітний вібратор;  
5 – притискний електромагніт

### Список використаних джерел

1. Ратушняк Г.С., Слободян Н.М. Вібросилова технологія формування декоративних бетонних виробів: Монографія. Вінниця: Універсум-Вінниця, 2007. 161 с.
2. Назаренко І.І. Теорія і практика створення машин будіндустрії на основі синтезу систем "машина-середовище". Техніка будівництва. 2002. № 13. С. 6–14.
3. Назаренко І.І., Баранов Ю.О., Басараб В.А. Дослідження взаємодії бетонної суміші з робочим органом електромагнітної ударно-вібраційної установки. Вібрації в техніці та технологіях. 2013. № 3 (71). С. 55–60.
4. Chai, M.; Hu, C.; Cheng, M. Study on the Effect of Vibrating Process on the Compactness of Slipform Concrete. Appl. Sci. 2023, 13, 8421. DOI: <https://doi.org/10.3390/app13148421>
5. Concrete consolidation. Division general catalogue: vibrators for concrete compaction. Access mode: [https://www.olivibra.com/wp-content/uploads/2022/07/Cat\\_ConcreteCons\\_CCC\\_EN\\_0122\\_REV13-2-1.pdf](https://www.olivibra.com/wp-content/uploads/2022/07/Cat_ConcreteCons_CCC_EN_0122_REV13-2-1.pdf)
6. Smith J., Rampit R., Parey R. Characterization of Vibration Effects on the Internal Structure and Strength of Regular and High Strength Recycled Concrete. Sixth International Conference on Durability of Concrete Structures, 18–20 July 2018, University of Leeds, Leeds, West Yorkshire, LS2 9JT, United Kingdom. Access mode: [https://docs.lib.purdue.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1247&context=icdcs&utm\\_source](https://docs.lib.purdue.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1247&context=icdcs&utm_source)
7. Ратушняк Г.С., Слободян Н.М. Вібросилова технологія формування декоративних бетонних виробів: Монографія. Вінниця: Універсум-Вінниця, 2007. 161 с.
8. Lanets O.S. High efficiency interresonance vibrating machines with electromagnetic drive (Theoretical foundations and building practice). Lviv: NULP, 2008. 324 p. (Ukr).
9. Despotovic Z., Stojilkovic Z. Power converter control circuits for two-mass vibratory conveying system with electromagnetic drive: simulations and experimental results. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2007. Vol. 54, № 1. P. 453–466. DOI: <https://doi.org/10.1109/tie.2006.888798>
10. Chernov, O.O., Monchenko, M.Y. Energy efficiency of the vibratory device electromagnetic drive system. Технічна електродинаміка. 2015. No 1. Pp. 20–25. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2016.01.020>
11. Chernov O.O., Hurov A.P., Ivanov A.V. Energy characteristics of the electromagnetic vibration drive with pulse power supply of vibrator coils. Технічна електродинаміка. 2023. № 2. С. 53–60. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2023.02.053>
12. Козлов А.Ю. Перспективи розвитку технологій виробництва високоякісних бетонних виробів із застосуванням керованих електромагнітних приводів та елементів з регульованою жорсткістю. Сучасні проблеми автоматики та електротехніки. Матеріали всеукраїнської науково-технічної конференції. 2020. С. 14–17. Режим доступу: <https://rep.nuos.edu.ua/server/api/core/bitstreams/69a859ad-28a6-41de-b086-5e5b377033c1/content>
13. Chernov O.O., Kozlov A.Yu. Modeling of a controlled electromagnetic vibration drive with a variable resonant frequency. Технічна електродинаміка. 2023. №4. С. 62 – 71. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2023.04.062>
14. Черно О.О., Козлов А.Ю. Комбіноване керування частотою вібраційної машини зі змінною частотою резонансу. Електромеханічні і енергозберігаючі системи. 2023. № 3. С. 56–63. DOI <https://doi.org/10.32782/2072-2052.2023.3.62.6>

# СЕКЦІЯ 1. АВТОМАТИЗОВАНИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД

УДК 621.865.8

*Васильєв О. Г., к.т.н.; Савченко О. В.; Заворотний А. О.*

*Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв*

## МОДЕРНІЗАЦІЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА МАНІПУЛЯТОРА У СКЛАДІ РТК МЕХАНООБРОБКИ

Інтенсивний розвиток сучасної промисловості характеризується впровадженням нової автоматизованої техніки, зокрема гнучких автоматизованих виробництв, де ключову роль відіграють роботизовані технологічні комплекси (РТК).

Найбільш масовим напрямком використання РТК є саме сфера механообробки, де задіяна найбільша кількість технологічного обладнання (ТО) та працюючого персоналу. Центральним виконавчим елементом таких комплексів є промисловий маніпулятор, ефективність якого безпосередньо впливає на продуктивність та надійність усього виробничого циклу.

Існуючі системи керування електроприводів (ЕП) маніпуляторів часто не в змозі повною мірою компенсувати вплив нелінійних факторів та динамічних навантажень, що виникають під час руху. Це призводить до виникнення значних статичних та динамічних похибок, вібрацій, збільшення часу циклу виконання операцій, що знижує загальну ефективність РТК.

Отже, розробка та дослідження автоматизованої системи керування ЕП маніпулятора, яка б забезпечувала високу точність при значній швидкодії в умовах складних та змінних динамічних навантажень, є надзвичайно важливим та актуальним науково-технічним завданням. Його вирішення дозволить суттєво підвищити якісні показники роботи РТК механообробки, покращити якість продукції та розширити технологічні можливості сучасного автоматизованого виробництва.

**Метою роботи** є оцінювання динамічних властивостей та підвищення точності системи автоматичного керування ланцюгами промислового робота.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно розв'язати наступні завдання:

- провести аналіз технологічного процесу в РТК механообробки, охарактеризувати об'єкт керування – маніпулятор та побудувати його кінематичну модель;
- обґрунтувати вибір електродвигуна постійного струму та комплектного тиристорного електропривода, виконати розрахунок параметрів їх силової частини та передатних коефіцієнтів;
- розробити математичну модель двоконтурної системи підпорядкованого регулювання та виконати синтез регуляторів струму і швидкості;
- провести комп'ютерне моделювання динамічних характеристик розробленої системи в середовищі MATLAB/Simulink, порівняти різні закони керування та обрати оптимальну структуру.

У сучасному машино- та приладобудуванні спостерігається суттєве протиріччя між можливостями існуючих засобів автоматизації та особливостями окремих виробничих процесів, які традиційно вважаються ручними і пов'язані з підготовкою виробництва й обслуговуванням ТО, тобто таких, як завантаження і розвантаження робочих машин, міжопераційне живлення, підготовка впорядкованого середовища тощо.

В останній час у зв'язку із задачами комплексної автоматизації виробництва велика увага приділяється автоматизації операцій маніпулювання – переміщення й орієнтації виробів та інструменту. Особливу роль у цьому плані відводиться новому класу технічних засобів із гнучкими технологічними властивостями – промисловим роботам (ПР) [1, 2].

Однак ПР, будучи ключовим елементом, рідко функціонує ізольовано. Для повноцінного вирішення виробничих завдань його необхідно інтегрувати з ТО (верстатами, пресами), допоміжними пристроями (накопичувачами, конвеєрами) та системами керування. Саме така інтегрована система, що об'єднує один або декілька ПР з іншими елементами виробництва в єдину, злагоджену структуру, і отримала назву роботизований технологічний комплекс (РТК).

РТК – це автономно діюча сукупність технологічних засобів виробництва, функціонально об'єднаних для виконання багаторазових циклів у межах єдиного виробничого процесу. Він є системним вирішенням задачі

омплексної автоматизації, де центральною ланкою виступає ПР, що автоматизує операції маніпулювання та пов'язує інші компоненти в єдиний процес.

До його складу входять такі основні компоненти, як ТО, ПР та допоміжне обладнання (ДО).

Для завдань обслуговування металообробних верстатів, таких як завантаження-розвантаження заготовок і деталей, маніпулятор повинен відповідати низці вимог: мати достатню вантажопідйомність, робочу зону, що охоплює необхідні позиції, а також високу швидкість та точність позиціонування для мінімізації циклу обробки.

В роботі розглядається РТК механообробки на базі токарського патронного верстата СТПР-160.

До складу РТК механообробки входять: верстат, промисловий робот, транспортні пристрої; накопичувачі.

На рис. 1 показано планування РТК для випадку, коли ПР обслуговує 1 верстат.

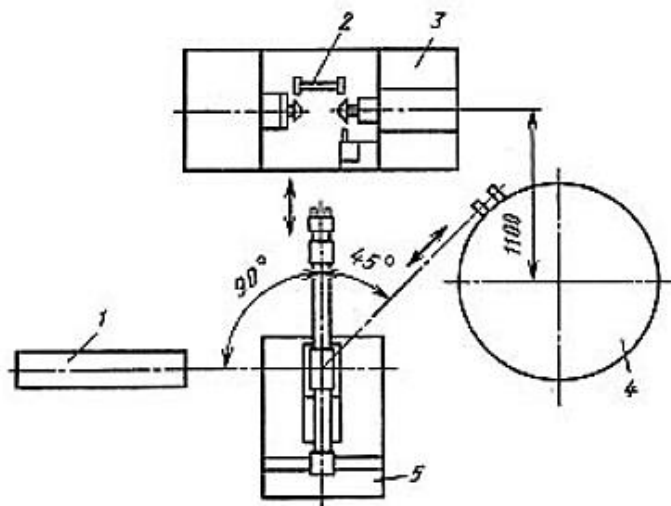


Рисунок 1 – Планування РТК механообробки:

1 – лоток для передачі деталі на інший верстат; 2 – знімач; 3 – верстат;  
4 – магазин-накопичувач; 5 – ПР

Згідно з технічною характеристикою верстата, з урахуванням маси заготовки (8 кг) та захватного пристрою маніпулятора (не менш 7 кг) потрібно вибрати ПР із номінальною вантажопідйомністю більше 15 кг.

Тому в якості базової моделі для даного дослідження було обрано робот Fanuc M-20iA, планування робочої зони якого наведено на рис. 2.

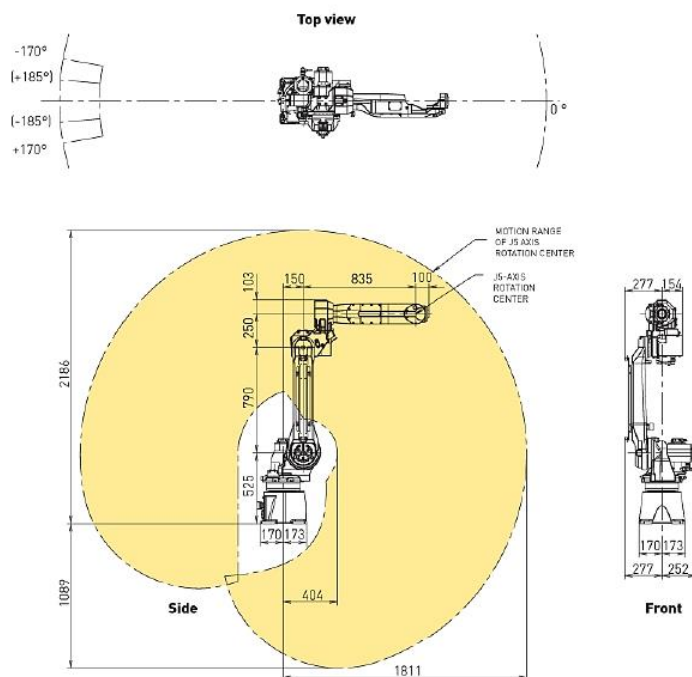


Рисунок 2 – Планування робочої зони робота Fanuc M-20iA

Ця модель є одним із поширених рішень у галузі автоматизації механообробки завдяки оптимальному поєднанню вантажопідйомності, робочої зони та динамічних характеристик, що робить її репрезентативним прикладом для подальшого аналізу систем керування [3].

Промисловий робот Fanuc M-20iA – це універсальний шестиосьовий маніпулятор, розроблений для широкого спектра завдань, включаючи вантажно-розвантажувальні операції, обслуговування верстатів, пакування, збирання та інші процеси, що потребують високої швидкості та точності.

Технічні характеристики робота наведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Технічні характеристики робота

| Параметри                                       | Значення |
|-------------------------------------------------|----------|
| Число ступенів рухливості                       | 6        |
| Вантажопідйомність (на зап'ясті), кг            | 20       |
| Додаткове навантаження (на плечі J3)            | 12       |
| Максимальна досяжність, мм                      | 1811     |
| Точність позиціонування (згідно з ISO 9283), мм | ±0,08    |
| Радіус інтерференції, мм                        | 321      |
| Вага маніпулятора, кг                           | 250      |

ЕП кожної осі промислового маніпулятора є ключовим виконавчим елементом, який забезпечує перетворення електричної енергії в механічний рух та реалізує задані траєкторії з необхідною точністю та динамікою. Робота ЕП маніпулятора у складі РТК характеризується специфічними та значно жорсткішими вимогами порівняно з приводами загальнопромислових механізмів.

Промислові роботи (маніпулятори) включають в себе рухливі ланки двох типів:

- ланки, що забезпечують поступальний рух;
- ланки, що забезпечують кутові переміщення.

Як правило, для універсальних ПР застосовуються гідроприводи або електроприводи. При цьому можливі два варіанти: розімкнутий дискретний привод і замкнутий привод, що стежить. Дискретний привод може бути або чисто електричним, або електрогідролічним, коли малопотужні електричні крокові двигуни обертають золотник гідропідсилювачів обертових моментів.

Експлуатаційні якості приводів обох типів рівноцінні. Обидва типи дозволяють створити як позиційні, так і контурні системи керування.

У більшості універсальних ПР застосовується привод, що стежить, замкнутий по положенню.

Найбільш зручні в експлуатації електричні приводи. Вони регулюються в широких межах, легко стабілізуються, мають гарні характеристики.

Найбільш перспективні в робототехніці двигуни постійного струму з збудженням від постійних магнітів, вони відрізняються меншою інерційністю та більш високим ККД.

Для реалізації сервозадач застосовують регульовані ЕП змінного та постійного струму. Приводи змінного струму, зокрема синхронні та асинхронні, забезпечують високі динамічні показники, однак їх системи керування базуються на реалізації складних, нелінійних векторних алгоритмів.

Водночас високомоментні двигуни постійного струму (ДПС) є класичною основою для побудови високоточних систем керування. Їхня ключова перевага – прямий зв'язок між струмом якоря та електромагнітним моментом, що значно спрощує синтез регуляторів. Лінійність математичної моделі ДПС дозволяє реалізувати прозору та ефективну структуру підпорядкованого регулювання координат (контурів струму та швидкості), принципи якої є фундаментальними для всіх типів сервоприводів.

Таким чином, поєднання високих регульовальних властивостей та простоти реалізації точного керування моментом визначає доцільність застосування системи ЕП на базі високомоментного ДПС.

Вибір конкретної моделі електродвигуна здійснюється на основі розрахунку потужності, яку двигун повинен розвивати для забезпечення заданих динамічних характеристик приводу осі маніпулятора. Розрахунок проводиться для однієї з найбільш навантажених обертальних осей, що дозволяє продемонструвати загальну методику.

Потужність привода обертальної координати  $N_b$  (Вт) визначається за формулою

$$N_b = \frac{10 \cdot m_n \cdot r \cdot \omega}{\eta} \cdot \left( \frac{r \cdot \omega^2}{\theta} + 1 \right),$$

де  $m_n$  – навантаження на привод,  $m_n = 120$  кг;

$r$  – максимальний радіус зони обслуговування,  $r = 1,811$  м;

$\omega$  – кутова швидкість,  $\omega = 0,26$  рад/с;

$\eta$  – ККД передачі, яка зв'язує двигун з виконавчим механізмом,  $\eta = 0,7$ .

$$N_B = \frac{10 \cdot 120 \cdot 1811 \cdot 0,26}{0,7} \cdot \left( \frac{1811 \cdot 0,26^2}{0,25} + 1 \right) \approx 12.$$

Для надійної роботи системи та забезпечення необхідного запасу потужності, номінальна потужність двигуна  $N_n$  повинна перевищувати розрахункове значення  $N_B$ .

На підставі проведених розрахунків потужності двигуна приймаємо двигун типу ПБВ-100L потужністю 2,2 кВт [4].

Для керування електродвигунами постійного струму випускаються комплектні вітчизняні серійні ЕП ЕТ6С, ЕТУ 3601 (БТУ3601), ЕТ6-3, ЕТ3И, ЕТУ2-2П, ЕТА (тиристорні трифазні з двоконтурною системою підпорядкованого регулювання і ряд інших).

Комплектні ЕП комплектуються високомоментними двигунами серії: МТ, ДК-1, Д-101, ПБВ, ПФВ.

З урахуванням необхідності реалізації реверсивного, швидкодіючого привода для задачі керування маніпулятором, а також сумісності з обраним двигуном серії ПБВ, для подальшого аналізу та розрахунків вибирається комплектний ЕП типу ЕТУ2-2П [4].

Даний електропривод призначений для приводів подач верстатів із ЧПК і робіт із тривалими моментами 1,7–47 Н·м.

Система керування ЕП (рис. 3) представляє собою двоконтурну систему керування частоти обертання вала двигуна з підлеглим струмовим контуром.

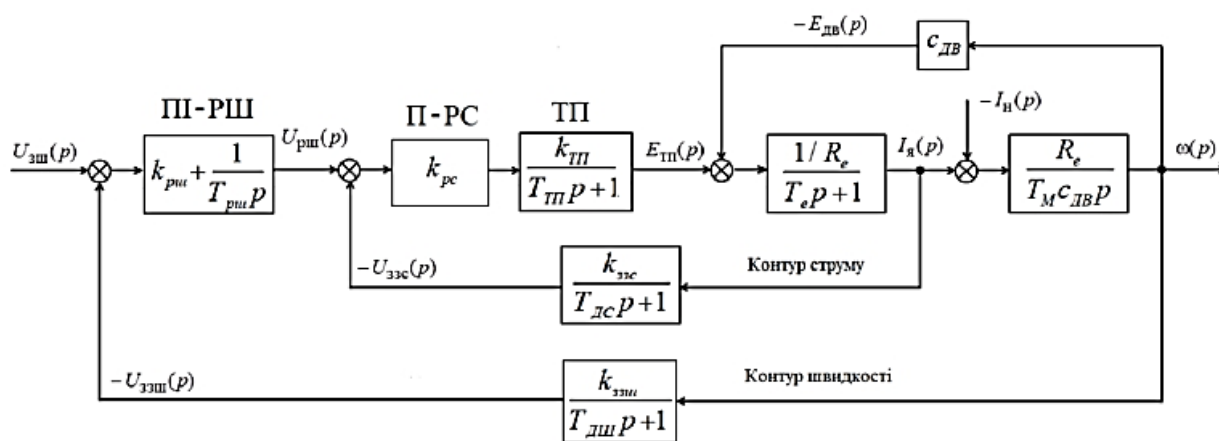


Рисунок 3 – Структурна схема системи керування ЕП

В структурній схемі системи керування ЕП вихідний сигнал регулятора швидкості, включений у зовнішній контур, є задаючим для регулятора струму, включеного у внутрішній контур. Налаштування регуляторів відбувається незалежно і послідовно від внутрішнього контуру до зовнішнього [5].

Структурна схема складається з пропорційно-інтегрального регулятора швидкості, пропорційного регулятора струму, тиристорного перетворювача, ДПС та датчиків зворотного зв'язку.

Для дослідження динамічних характеристик системи керування електропривода, представленої на рис. 3, відповідно до математичного опису, розроблені схеми динамічних розрахункових моделей системи з різними законами керування з використанням програми Simulink пакету MatLab, яка дозволяє побачити протікання перехідних процесів для системи керування [6].

Розрахункові схеми динамічних моделей системи наведені на рис. 4. На рис. 4 показані схеми замкненої системи з ПІ-регулятором швидкості, П-регулятором швидкості та з ПІ-регулятором швидкості і фільтром на вході в систему.

Результати аналізу перехідних процесів за швидкістю показані на рис. 5, а для перехідних процесів за струмом – на рис. 6.

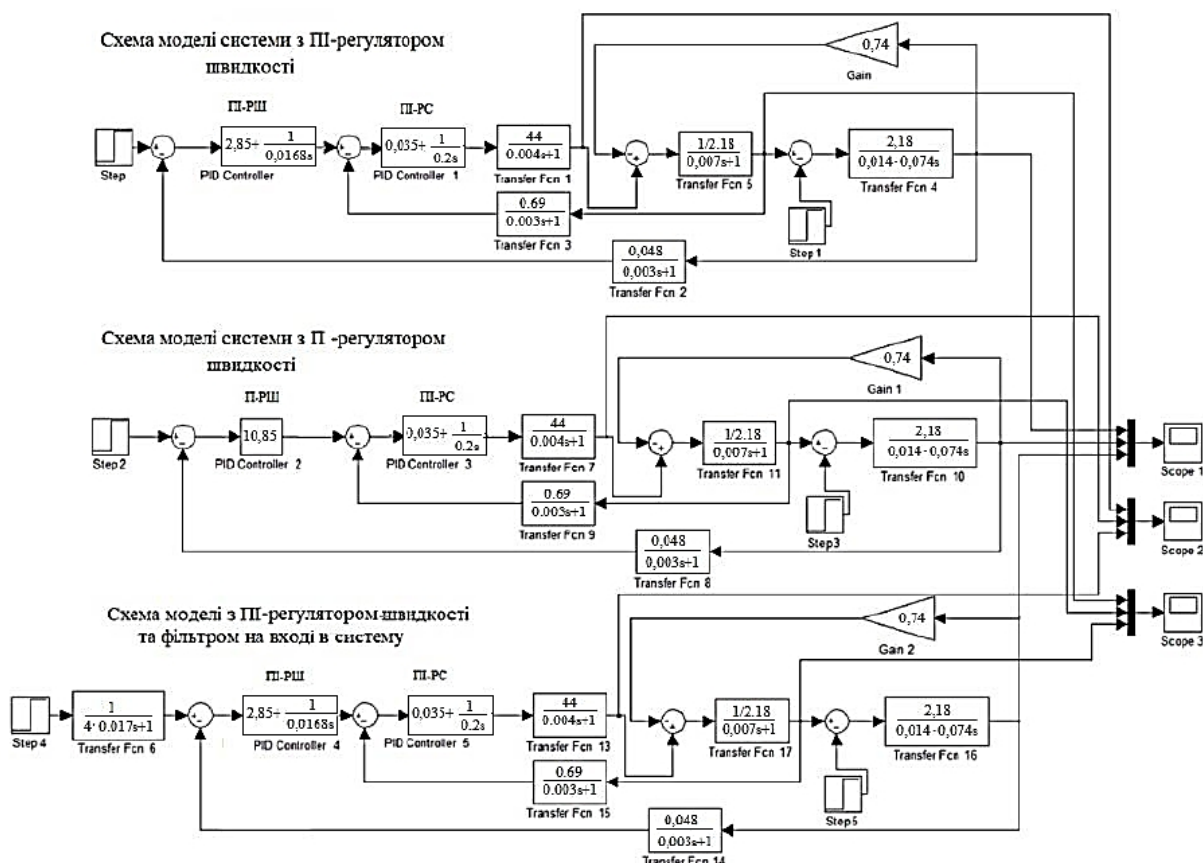


Рисунок 4 – Розрахункові схеми динамічних моделей системи керування

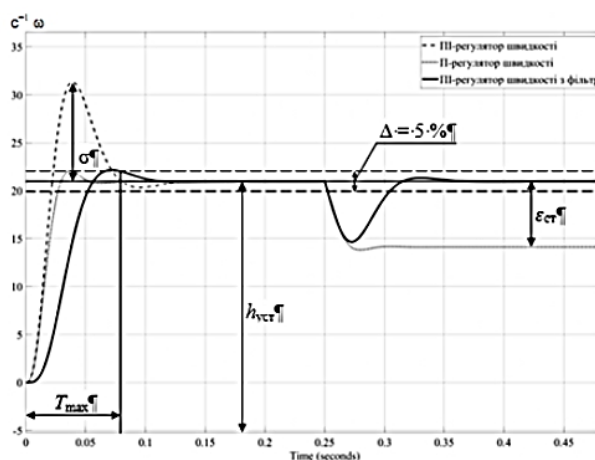


Рисунок 5 – Перехідні процеси по швидкості

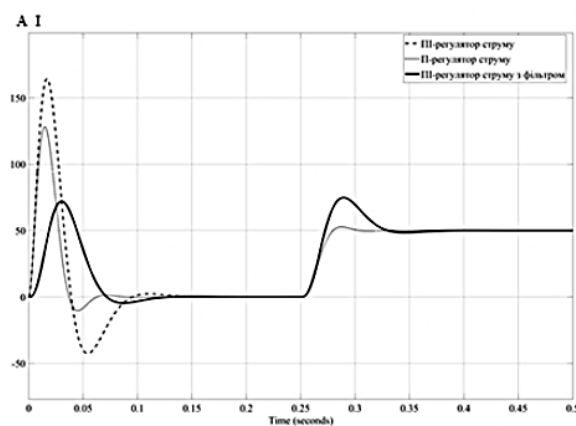


Рисунок 6 – Перехідні процеси по струму

Основні показники якості регулювання зведені в табл. 2.

Таблиця 2 – Основні показники якості перехідних процесів

| Тип регулятора                  | $h_{уст}, c^{-1}$ | $h_{max}, c^{-1}$ | $\sigma, \%$ | $T_{max}, c$ | $\varepsilon_{ст}, \%$ | $N$ |
|---------------------------------|-------------------|-------------------|--------------|--------------|------------------------|-----|
| ПІ-регулятор                    | 21                | 31,3              | 49,4         | 0,0725       | 0                      | 1   |
| П-регулятор                     | 21                | 22,1              | 5,48         | 0,0401       | 32,49                  | 1   |
| ПІ-регулятор та фільтр на вході | 21                | 22,2              | 5,69         | 0,0794       | 0                      | 1   |

Враховуючи отримані результати дослідження, остаточно для системи керування була обрана схема з ПІ-регулятором та фільтром на вході в систему.

**Висновки.** Метою даної роботи була модернізація автоматизованої системи керування ЕП маніпулятора у складі РТК механообробки.

В результаті дослідження динамічних властивостей системи керування отримано наступні результати:

- при застосуванні пропорційно-інтегрального закону регулювання (ПІ-регулятор) перерегулювання склало  $\sigma = 49,4 \%$ , що є неприйнятним для точних систем позиціонування, при часі перехідного процесу  $T_{\max} = 0,0725$  с;

- при застосуванні пропорційного закону регулювання (П-регулятор) перерегулювання зменшилось до  $\sigma = 5,48 \%$ , але виникла велика статична похибка  $\varepsilon = 32,49 \%$ ;

- при введенні аперіодичної ланки (фільтра) на вхід системи керування з ПІ-регулятором вдалося досягти оптимальних показників: перерегулювання склало  $\sigma = 5,69 \%$ , час перехідного процесу  $T_{\max} = 0,0794$  с, при повній відсутності статичної похибки;

- на основі аналізу отриманих даних було обрано систему керування із застосуванням ПІ-регулятора швидкості та фільтра на вході, яка забезпечує високу точність та швидкодію;

- при такій структурі системи керування максимальні відхилення струму не перевищують максимально допустимих значень.

Таким чином, можна зробити висновок, що дана модернізація покращила динамічні характеристики системи.

#### Список використаних джерел

1. Гнучкі комп'ютеризовані системи: проектування, моделювання і управління : підручник / Л.С. Ямпольський, П.П. Мельничук, Б.Б. Самотокін та ін. – Житомир : ЖДТУ, 2005. – 680 с.: 362 іл.
2. Павленко І.І., Мажара В.А. Роботизовані технологічні комплекси : навч. посібник. – Кіровоград : КНТУ, 2010. – 392 с.
3. FANUC Robotics M-20iA Series. [Електронний ресурс]: Режим доступу <https://www.irsrobotics.com/wp-content/uploads/2024/01/M-20iA-Series.pdf>.
4. Васильєв О.Г. Методичні вказівки до виконання курсової роботи з дисципліни «Системи керування промисловими робототехнічними комплексами» / О.Г. Васильєв, С.І. Ольшевський, О.О. Черно. – Миколаїв : НУК, 2022. – 128 с.
5. Регульований електропривод : підручник / Голодний І.М., Лавріненко Ю.М., Козирський В.В. та ін. ; за ред. І.М. Голодного. – Київ : ТОВ «ЦП «Компринт», 2015. – 509 с.: іл.
6. Гераїмчук М.Д., Лазарев Ю.Ф., Толочко Т.О. Моделювання систем у середовищі MATLAB-SIMULINK: комп'ютерний практикум. – Київ, 2006. – 175 с.

УДК 681.5

*Білюк І. С., к.т.н.; Савченко О. В.; Козлов А. Ю., PhD; Іванов А. В., PhD; Теплов С. Б.*  
*Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв*

## МОДЕРНІЗАЦІЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТОКАРНОГО ПАТРОННО-ЦЕНТРОВОГО ВЕРСТАТА

**Метою роботи** є розробка та впровадження модернізованої системи керування токарного патронно-центрального верстату з числовим програмним керуванням (ЧПК) типу 16Б16Ф3 з використанням програмованого логічного контролера Siemens S7-1200 для підвищення надійності, точності, гнучкості та ефективності керування технологічним процесом обробки деталей.

Сучасні умови виробництва вимагають високого рівня автоматизації, точності та надійності при обробці деталей на металообробному обладнанні. Багато підприємств продовжують експлуатувати токарні верстати з числовим програмним керуванням (ЧПК), які морально та технічно застаріли, особливо у частині системи керування. Це призводить до зниження продуктивності, збільшення кількості відмов та ускладнення обслуговування обладнання. Одним із ефективних шляхів вирішення цієї проблеми є модернізація систем керування за допомогою сучасних програмованих логічних контролерів (ПЛК). Використання ПЛК дозволяє спростити структуру керування, покращити надійність роботи, розширити функціональні можливості та забезпечити легкість оновлення програмного забезпечення [1].

Актуальність теми також зумовлена необхідністю інтеграції старого парку обладнання у сучасні автоматизовані виробничі системи з можливістю дистанційного моніторингу, збору даних та швидкої адаптації до змін у виробничих процесах. Тому розробка та впровадження нової системи керування на базі ПЛК є важливим та своєчасним завданням, що сприяє розвитку технологій у галузі машинобудування та автоматизації.

Патронно-центровий верстат 16Б16Ф3 служить для механічної обробки поверхонь обертання. Він може бути використаний і для нарізування циліндричних і конічних різьблень, а також Архімедових спіралей. Спроектований на базі токарно-центрового верстата мод. 16Б16П з урахуванням стикування його із системою ЧПК. Верстат обладнаний датчиком обробки різьби, який встановлюється на лівій частині торця передньої бабки. Конструкція верстата дозволяє проводити обробку зовнішніх і внутрішніх поверхонь обертання деталей при їх установці як в центрах, так і в патроні. Межі застосування верстата 16Б16Ф3 при патронній та центровій обробці практично рівнозначні. Застосування тільки чотирьох інструментів, які монтуються в передній різцетримач, трохи зменшує можливості механічної обробки верстата. Верстат має ЧПК типу EM-907, який використовує код ISO-7біт на восьмидорожній перфострічці [2].

16Б16Ф3 комплектується ЧПК H22-1М. H22-1М призначена для оснащення токарних верстатів зі зміною інструмента. Передбачена можливість введення програми в приростах і абсолютних координатах [3]. Режим роботи верстата задаються перемикачем на пульті оператора ЧПК. На теперішній час система числового програмного керування H22-1М вважається морально і технічно застарілою, хоча ще використовується на деяких підприємствах та в освітніх установах. Вона має низку суттєвих недоліків, які обмежують її ефективність у сучасному виробництві. Зокрема, її продуктивність і швидкодія є низькими через застарілу процесорну базу, що не дозволяє обробляти великі обсяги даних або виконувати точні складні траєкторії. Програмування системи складне й незручне: введення команд здійснюється вручну або з перфострічки, що підвищує ризик помилок та ускладнює корекцію. Інтерфейс користувача примітивний – без графічного дисплея та з мінімальною індикацією, що ускладнює налагодження й роботу. Також система чутлива до збоїв: часто виникають зупинки через несправності у зчитуванні стрічки або помилки в структурі кадру, а можливості самодіагностики дуже обмежені.

Для модернізації верстата було обрано ПЛК S7-1200, який може забезпечити достатню гнучкість завдяки своїй потужності, що дозволяє керувати широким спектром пристроїв. ПЛК доволі потужний завдяки центральному процесору (ЦП), який об'єднує компактний корпус мікропроцесора, вмонтований блок живлення, та вхідні і вихідні інтерфейси. Після програмування ЦП реалізує логіку, як необхідна для автоматизації керування пристроями у певному застосунку. ЦП в реальному часі відстежує вхідні сигнали та змінює вихідні сигнали згідно за алгоритмом користувача. Обмін даними виконується через порт *PROFINET*, який має ЦП. Для обміну даними через мережі *RS232* чи *RS485* мається в наявності комунікаційний модуль. Центральний процесор ПЛК S7-1200 може бути розширений за допомогою сигнальної плати та сигнального модуля. Для підтримки іншого протоколу зв'язку встановлюється додатковий комунікаційний модуль.

У межах модернізації системи керування токарного верстата 16Б16Ф3 була розроблена функціональна схема, яка забезпечує повну автоматизацію обробки деталей із застосуванням сучасного програмованого логічного контролера *Siemens S7-1200*. Основна ідея цієї схеми полягає в тому, щоб централізувати керування усіма вузлами верстата, включаючи виконавчі механізми, системи безпеки, індикації, змащення та охолодження, а також забезпечити обробку зворотних сигналів від сенсорних елементів для реалізації точного, надійного та безпечного керування.

Взаємодія з оператором здійснюється через операторську панель (ПК), яка дозволяє задавати режими роботи, параметри обробки та спостерігати за станом системи в реальному часі. З операторської панелі сигнали надходять до ПЛК, який виконує логічну обробку інформації відповідно до закладеної програми. Контролер приймає сигнали від датчиків положення, обертів, температури, навантаження, а також від системи безпеки, що дозволяє йому приймати оперативні рішення щодо запуску або зупинки виконавчих пристроїв, переміщення по координатах, а також вмикання допоміжних систем.

Основний алгоритм роботи автоматизованої системи керування (рис. 1) побудований за принципом циклічного виконання етапів обробки, що відповідають типовим технологічним процесам на токарному верстаті. Програмований логічний контролер виконує безперервний моніторинг стану обладнання, приймає сигнали від оператора через панель ПК, аналізує дані з датчиків і формує відповідні керуючі сигнали до виконавчих механізмів.

Основна логіка передбачає запуск обробки через натискання кнопки «ПУСК» на ПК. Після цього відбувається послідовна активація головного приводу шпинделя, включення системи охолодження та ініціація подачі інструменту по осі X. Далі, після досягнення проміжної координати, починається переміщення по осі Z. Завершення обробки фіксується сигналом «КІНЕЦЬ ЦИКЛУ», після чого активується підрахунок завершених деталей і можливість запуску нового циклу. Приклад циклограми роботи верстату наведено на рис. 2.

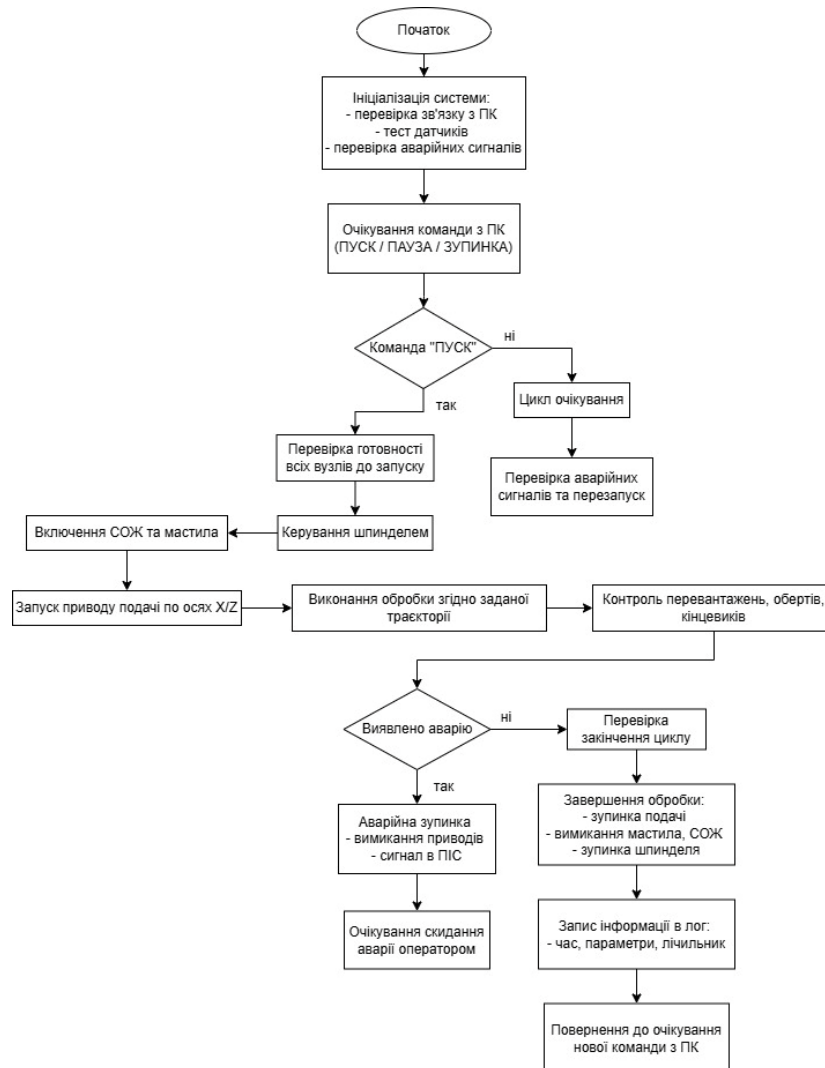


Рисунок 1 – Основний алгоритм програми

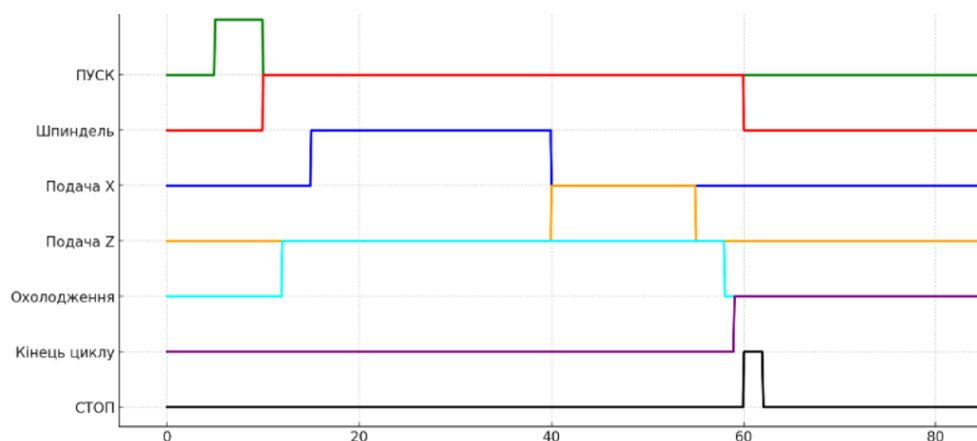


Рисунок 2 – Циклограма роботи патронно-центрового верстату 16Б16Ф3

Розроблена циклограма роботи системи візуально підтверджує правильність роботи логіки. Графік демонструє часову послідовність активації кожного з компонентів системи: з моменту натискання «ПУСК» відбувається запуск шпинделя, охолодження, подача по X, потім Z, завершення процесу та зупинка. Затримки між етапами програмно реалізуються через вбудовані таймери, що дозволяє досягти стабільного і координованого керування.

**Висновок.** В процесі виконання роботи було розроблено, спроектовано та частково реалізовано модернізовану систему автоматичного керування токарного верстата з числовим програмним керуванням на базі

програмованого логічного контролера *Siemens S7-1200*. Проведено технічне обґрунтування вибору ПЛК, описано логіку її роботи та створено повноцінний програмний код мовою релейно-контактної логіки. Для підтвердження правильності побудованої логіки було складено циклограму, яка ілюструє часову послідовність активації функціональних блоків, відповідно до логіки керування. Принцип дії програми повністю відповідає очікуваній роботі обладнання, забезпечуючи високий рівень надійності, гнучкості та зручності в керуванні. Запропоноване рішення дозволяє істотно підвищити функціональність та ефективність роботи верстата 16Б16Ф3, забезпечити простоту обслуговування та розширити можливості операторського контролю.

#### Список використаних джерел

1. Yao. C. Application of programmable logic control in the nonlinear machine tools // Engineering.
2. Станки токарно-винторезные 16Б16, 16Б16п, 16л20, 16л20п, 16л20ф1, 16л20пф1, 16г16, 16г16к, 16Б16к, 16Б16кп, 16л20к, 16л20кп, 16г16кп. Руководство по эксплуатации 16Б16П.000.000 РЭ, 1989. – С. 19–29.
3. PLC Programming Fundamentals Book [Електронний ресурс] / SolisPLC. – 2023.
4. SIMATIC S7-1200 Programmable Controller – System Manual [Електронний ресурс]. – Siemens AG, 2021. – 618 с.
5. Білюк, І., & Савченко, О. (2025). Модернізація системи керування електропривода подач токарно-карусельного верстата. EDITOR COORDINATOR.

#### УДК 681.5

*Білюк І. С., к.т.н.; Савченко О. В.; Козлов А. Ю., PhD; Іванов А. В., PhD; Ярошинський О. В.*  
*Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв*

### ПРОЄКТУВАННЯ ЛОГІЧНОГО КОНТРОЛЕРА

Дана робота присвячена розробці програмованого логічного контролера на базі мікроконтролера PIC16F877A для застосування у системах промислової автоматизації. Проведено комплексне дослідження та проектування як апаратної, так і програмної частини системи з урахуванням вимог до надійності, функціональності та безпеки експлуатації.

Програмовані логічні контролери, або ПЛК, є одним з найважливіших компонентів сучасних автоматизованих систем керування. Вони застосовуються у найрізноманітніших сферах промисловості для реалізації алгоритмів логічного керування технологічними процесами. Основною особливістю ПЛК є можливість виконання складних логічних та арифметичних операцій, керування виконавчими механізмами, обробки сигналів з різних типів датчиків, а також інтеграція з іншими інформаційними системами, зокрема SCADA та MES. Завдяки гнучкості програмування, високій надійності та адаптованості до роботи у жорстких умовах навколишнього середовища.

У структурі будь-якого ПЛК ключову роль відіграють входи та виходи, які забезпечують фізичну взаємодію пристрою з об'єктом автоматизації. Саме через ці канали ПЛК зчитує інформацію про стан технологічного процесу, приймає рішення відповідно до закладеної логіки та передає сигнали для виконання дій. Входи й виходи є основними інтерфейсами між цифровою логікою керування, реалізованою у мікропроцесорі, та реальним середовищем, яке складається з датчиків, виконавчих механізмів, сигналізаторів та інших компонентів [1, 2].

Усі входи ПЛК поділяються на цифрові та аналогові, залежно від типу сигналу, який вони обробляють. Цифрові входи приймають дискретну інформацію, яка має лише два можливі стани: логічний нуль (0) і логічну одиницю (1), що зазвичай відповідає низькому або високому рівню напруги. Такі входи використовуються для зчитування стану кнопок, перемикачів, кінцевих вимикачів, оптичних або індуктивних датчиків присутності, сигналів з реле, контакторів, а також з іншого цифрового обладнання. У свою чергу, аналогові входи дають змогу зчитувати змінні сигнали. До таких сигналів належать струм 4–20 мА, напруга 0–10 В, 0–5 В, а також сигнали з термодатчиків, терморезисторів типу PT100/PT1000, датчиків тиску, рівня, витрати, температури тощо. Аналогові сигнали обробляються за допомогою внутрішніх аналого-цифрових перетворювачів (АЦП), які перетворюють фізичну величину у цифрове представлення, що надалі використовується у програмі контролера.

Вибір мікроконтролера для побудови програмованого логічного контролера (ПЛК) є одним з ключових етапів проєктування автоматизованої системи. Насамперед слід визначити необхідну кількість входів/виходів, що забезпечують взаємодію ПЛК з об'єктом керування. Для більшості задач ПЛК потрібна підтримка як дискретних (цифрових), так і аналогових входів. Це дозволяє контролювати стан технологічного процесу, зчитуючи сигнали з датчиків різного типу – як цифрових, так і аналогових. У свою чергу, керуючі виходи повинні дозволяти формувати сигнали для електроприводу виконавчих механізмів, таких як електромагнітні реле, контактори, двигуни тощо. Другим критично важливим фактором є наявність вбудованих інтерфейсів зв'язку для можливості інтеграції у промислові мережі для організації розподілених систем автоматизації. Серед найбільш поширених інтерфейсів слід відзначити *RS485*, *Ethernet*, *CAN* та інші.

У результаті всебічного аналізу було прийнято рішення використовувати мікроконтролер сімейства PIC – а саме, модель *PIC16F877A*[3] компанії *Microchip*. Це один із найпопулярніших представників серії PIC16, що забезпечує оптимальне поєднання функціональних можливостей, простоти програмування та надійності [3]. Його архітектура побудована за принципом *RISC (Reduced Instruction Set Computer)*, що забезпечує високу ефективність виконання команд при мінімальній кількості тактів процесора. Завдяки цьому *PIC16F877A* демонструє добру швидкодію та низьке енергоспоживання, що робить його ідеальним вибором для розроблення програмованого логічного контролера (ПЛК) у складі компактної системи автоматизації.

Модуль універсального асинхронного приймача-передавача (*UART*) мікроконтролера *PIC16F877A* є ключовим елементом для організації послідовного обміну даними. Його наявність дозволяє легко реалізувати фізичний рівень обміну по інтерфейсу *RS485*. Реалізація фізичного рівня *RS485* у проєктованому ПЛК здійснена за допомогою мікросхеми *MAX485*[4]. Це спеціалізований трансивер, призначений для організації повноцінного диференціального інтерфейсу відповідно до вимог стандарту *EIA-485*. Мікросхема *MAX485* дозволяє реалізувати як передавання, так і прийом даних по одному двопровідному кабелю.

В системах автоматизації електромеханічними пристроями часто здійснюється за допомогою релейних виходів, що дозволяє забезпечити електричну ізоляцію між керованими силовими ланками та мікроконтролером, а також керувати навантаженнями з високим струмом або напругою, що перевищують можливості мікроконтролера. У даній роботі для реалізації релейних виходів у складі програмованого логічного контролера (ПЛК) було обрано використання зовнішніх силових ключів на основі драйвера *ULN2803*[5] та низьковольтних реле. Релейний вихід у ПЛК виконує функцію керованого контакту, що замикається або розмикається за сигналом від логіки контролера.

На основі проведеного аналізу та обґрунтованого вибору елементної бази було спроектовано електричну схему програмованого логічного контролера (рис. 1), що реалізує необхідний функціонал для автоматизації системи керування виконавчими механізмами. Основу системи складає мікроконтролер *PIC16F877A* (на схемі позначений як *IC1*), що виконує функції центрального обчислювального ядра контролера. Саме він здійснює обробку сигналів з дискретних входів, прийом команд по інтерфейсу *RS485*, керування релейними виходами через драйвер *ULN2803*, а також забезпечує індикацію стану системи на *LCD*-дисплеї.

У нижній частині схеми представлено блок дискретних входів. Для взаємодії оператора з системою передбачено шість кнопок керування (*S1–S6*). Кожна кнопка підключена до окремої лінії порту мікроконтролера через відповідний резистор (*R9–R14*), який виконує функцію підтягуючого резистора, забезпечуючи стабільний логічний рівень на вході при розімкненому контакті. При натисканні кнопки вхідний сигнал змінюється, що фіксується програмним забезпеченням ПЛК для реалізації відповідних функцій керування.

**Висновок.** В роботі було розроблено логічний контролер на базі мікроконтролера *PIC16F877A* для застосування у системах промислової автоматизації. Проведено комплексне дослідження та проєктування як апаратної, так і програмної частини системи з урахуванням вимог до надійності, функціональності та безпеки експлуатації. Було виконано розроблення апаратної частини логічного контролера. Описано проєктовану схему на базі мікроконтролера *PIC16F877A*, проведено аналіз характеристик мікроконтролера, структури пам'яті, портів введення/виведення та реалізації обміну даними за допомогою інтерфейсу *RS485* на основі мікросхеми *MAX485* [6].

Робота підтвердила практичну можливість створення на базі недорогого мікроконтролера *PIC16F877A* 93 повноцінного логічного контролера з широким функціоналом, який може застосовуватись у різних галузях промислової автоматизації. Отримані результати дозволяють рекомендувати розроблену систему для подальшого впровадження та використання у складі промислових об'єктів.

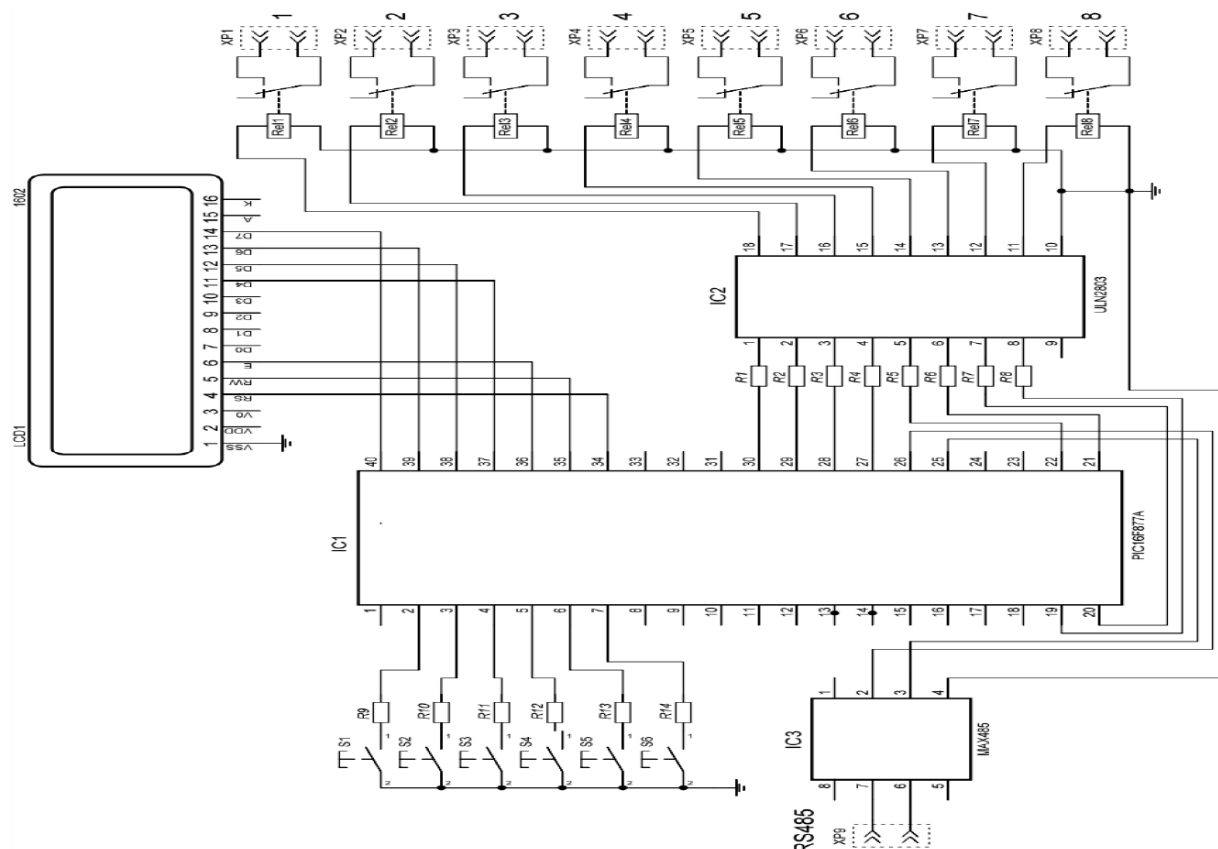


Рисунок 1 – Принципова схема логічного контролера

#### Список використаних джерел

1. IEC 61131-3:2013. Programmable controllers – Part 3: Programming languages. International Electrotechnical Commission. – 2013
2. Bolton W. Programmable Logic Controllers: Principles and Applications. 6th ed. Newnes, Elsevier, 2015.
3. Microchip. PIC16F877A Datasheet. Microchip Technology Inc. – 2021.
4. Texas Instruments. MAX485 Low-Power, Slew-Rate-Limited RS-485/RS-422 Transceivers. Datasheet. – 2020.
5. ULN2803A Datasheet. Texas Instruments / STMicroelectronics. – 2021.
6. Білюк, І., Савченко, О., Філоненко, Р. та ін. (2024). Інвертор На Базі Мікроконтролера AVR. *Scientific Collection «InterConf»*, (195), 326–329.

#### УДК 681.5

Білюк І. С., к.т.н.; Савченко О. В., Козлов А. Ю., PhD; Іванов А. В., PhD; Онищенко О. В.  
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв

### СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ ЖАЛЮЗІ

Робота присвячена проектуванню системи керування електроприводом жалюзі на основі мікроконтролера ESP32 та крокового двигуна.

Актуальність даної роботи полягає у розробці автоматизованої системи керування електроприводом жалюзі, яка поєднує в собі переваги сучасних технологій, таких як IoT, точне позиціонування та адаптивне керування. Автоматизовані системи дозволяють не лише підвищити комфорт користувачів, а й заощаджувати енергію за рахунок оптимального використання природного світла та запобігання перегріву приміщень.

Жалюзі є невід'ємною частиною сучасного інтер'єру, забезпечуючи не лише естетичну привабливість, але й функціональний контроль над освітленням приміщення. Одним з ключових аспектів при виборі жалюзей для користувача є тип системи керування, який визначає зручність використання та функціональні можливості.

Системи керування жалюзей можна умовно розділити на два основні типи: ручні та автоматизовані. Кожен з них має свої унікальні характеристики, переваги та сфери застосування.

Ручні – традиційні та найбільш поширені варіанти управління жалюзями. Класичні варіанти класифікації цієї системи представлені у шнурковому механізмі, стрічковому приводі, жердинному механізмі та рукоятковому приводі [1]. Характерно вони базуються на механічних принципах та потребують безпосередньої участі користувача для зміни положення або кута нахилу ламелей.

Автоматизовані системи керування представляють собою сучасне технологічне рішення, яке об'єднує електромеханічні приводи з різноманітними системами керування. Такі системи забезпечують високий рівень комфорту та функціональності. Поряд із тим, існують різні автоматизовані системи, серед яких визначаємо дротове і бездротове, смарт-системи і сенсорне керування. Найпростішим серед зазначених варіантів розглядаємо дротове керування. Воно передбачає використання кнопок та перемикачів, які підключаються до приводу за допомогою кабелю. У свою чергу, бездротове керування базується на зручних радіочастотних технологіях за допомогою контролерів дистанційного керування, які дозволяють управляти жалюзями з відстані до 30-50 метрів. Актуальними є смарт-системи, інтеграція яких за допомогою мобільного застосунку передбачає керування системою жалюзей через пристрої з будь-якої точки світу лише за наявності інтернет-з'єднання. Перспективним засобом керування є сенсорне, яке автоматизує роботу жалюзі на основі показників датчиків освітлення, температури, вітру або дощу. Вона самостійно реагує на зміни зовнішніх умов без участі користувача.

Технологічні рішення включають дротові з'єднання (низьковольтні лінії, протокол KNX, інтерфейс RS-485, мережі Ethernet) та радіозв'язок (радіочастотні канали, стандарти Zigbee, Z-Wave, Wi-Fi, Bluetooth LE). Остаточний вибір технології визначається специфікою завдання, фінансовими можливостями, розміром об'єкта та необхідністю взаємодії з наявним обладнанням.

Структурна схема розробленого пристрою приведена на рис. 1. Вона показує взаємодію між модулями, що використовуються в системі задля здійснення керування електродвигуном, відповідальним за позиціонування ламелей жалюзей відносно налаштувань, заданих в програмі керування.

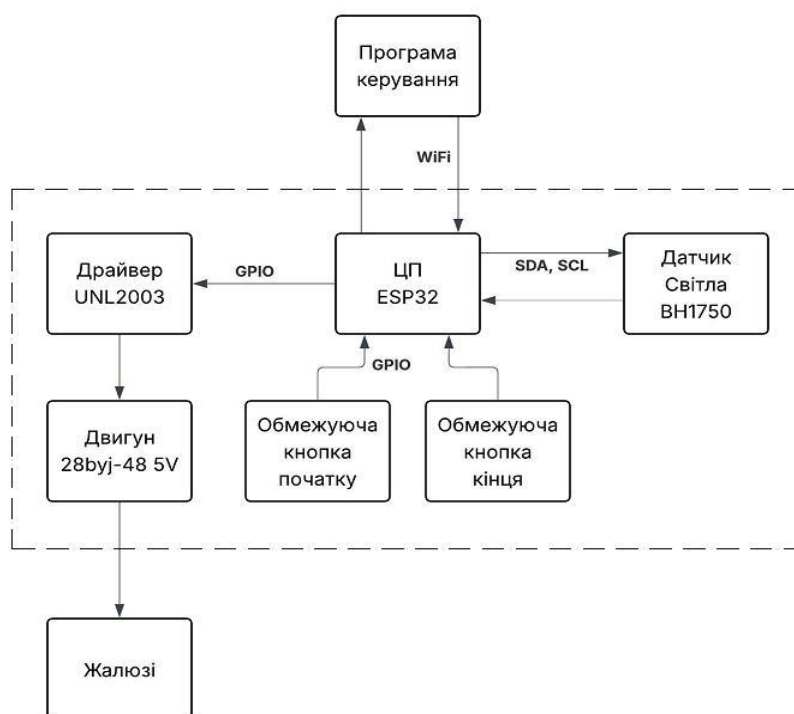


Рисунок 1 – Структурна схема системи керування жалюзі

Переміщення жалюзі здійснюється за допомогою крокового двигуна 28byj-48, працюючого від напруги 5В. Він дає можливість точного позиціонування ламелей на планці. Система спроектована під дистанційне, бездротове керування через Wi-Fi з'єднання з програмою управління. Користувач здатен як власноруч контролювати жалюзі, так і встановлювати налаштування наданих режимів автоматичної роботи.

Серед модулів було обрано: ESP-WROOM-32[3] (керуючий контролер), BH1750 (I2C датчик освітленості) [4], ULN2003 (драйвер управління та живлення кроковим двигуном) [5], 28byj-48 (кроковий двигун).

Для керування/налаштування автоматизованої системи була розроблена керуюча програма, блок-схему алгоритму якої можна побачити на рис. 2 [6, 7].

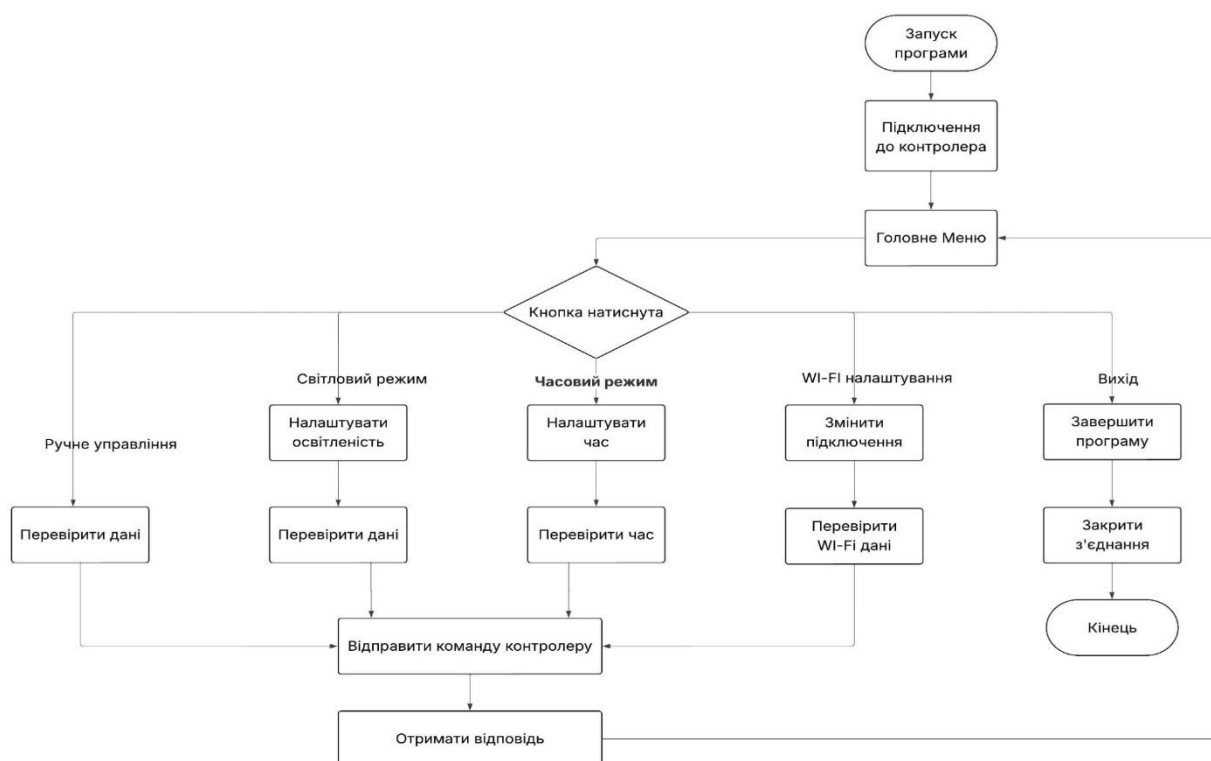


Рисунок 2 – Узагальнена блок-схема алгоритму роботи керуючої програми

Керуюча програма представляє вікно з кнопками налаштувань, де користувач обирає функції і команди. Представлені наступні режими: ручне керування (повне відкриття/повне закриття та відкриття/закриття на довжину, бажану користувачем); автоматизоване керування по показникам освітленості (закриття/відкриття, яке налаштовується користувачем через керуючу програму за допомогою введення верхнього та нижнього лімітів освітлення); автоматизоване керування за часом (закриття/відкриття, яке налаштовується користувачем через керуючу програму за допомогою введення часових лімітів); асинхронне логування (час, завантаження RAM, рух двигуна, ступінь освітленості); налаштування даних *WiFi*-мережі.

**Висновок.** В роботі було розроблено та впроваджено систему автоматизованого керування електроприводом жалюзей, яка поєднує в собі сучасні технології, енергоефективність та зручність використання. Система базується на модульній архітектурі, що дозволяє легко масштабувати її функціональні можливості. В якості основного керуючого елемента обрано мікроконтролер *ESP-WROOM-32*, який забезпечує високу продуктивність, підтримку бездротових технологій (*WiFi*, *Bluetooth*) та широкий спектр інтерфейсів для підключення периферії. Використання датчика освітленості *BH1750* дозволило реалізувати точний контроль рівня світла, а кроковий двигун *28BYJ-48* забезпечив плавне і безшумне позиціонування ламелей. Розроблена система може стати основою для подальших досліджень, зокрема впровадження штучного інтелекту для адаптивного керування або інтеграції з іншими системами "розумного будинку".

#### Список використаних джерел

1. Dyke C.; Van Den Wymelenberg K.; Djunaedy E.; Steciak J. Comparing Whole Building Energy Implications of Sidelighting Systems with Alternate Manual Blind Control Algorithms. *Buildings* 2015, 5, 467–496. <https://doi.org/10.3390/buildings5020467>
2. Bernt Meerbeek, Marije te Kulve, Tommaso Gritti, Mariëlle Aarts, Evert van Loenen, Emile Aarts, Building automation and perceived control: A field study on motorized exterior blinds in Dutch offices, *Building and Environment*, Volume 79, 2014, Pages 66–77, ISSN 0360–1323, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.04.023> (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132314001279>)
3. ESP32 Technical Reference Manual. URL: [https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32\\_technical\\_reference\\_manual\\_en.pdf](https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_technical_reference_manual_en.pdf) (дата звернення: 10.06.2025)

4. Цифровий датчик освітленості BH1750. URL: <https://robostore.com.ua/ua/moduli-i-datchiki/datchiki-osveshennosti/cifrovoj-datchik-osveshennosti-bh1750/> (дата звернення: 10.06.2025).
5. Phase ULN2003 Stepper Motor Driver PCB. URL: <https://www.electronicoscaldas.com/datasheet/ULN2003A-PCB.pdf> (дата звернення: 10.06.2025).
6. Білюк І. С., Савченко О. В., Камишанов та ін. (2023, February). Мікропроцесорна система керування крокового двигуна. In The 5th International scientific and practical conference "Prospects of modern science and education" (February 07–10, 2023) Stockholm, Sweden. International Science Group. 2023. 664 p. (p. 590).
7. Савченко О. В., Білюк І. С., Фоменко А. М. та ін. (2018). Система керування кроковими двигунами промислових роботів.

## УДК 681.5

*Білюк І. С., к.т.н.; Савченко О. В.; Козлов А. Ю., PhD; Іванов А. В., PhD; Пристайко Т. І.  
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв*

### СИСТЕМА КЕРУВАННЯ РОБОТА-МАНІПУЛЯТОРА МОДЕЛІ M20П.40.01

Дана робота присвячена розробці системи керування роботом-маніпулятором моделі M20П.40.01 із використанням ПЛК Siemens S7-1500. У процесі роботи буде здійснено аналіз типів маніпуляторів, вибір відповідного контролера, розробка функціональної схеми та програмного забезпечення керування.

Маніпулятори є важливим компонентом сучасних виробничих систем, що широко використовуються в промисловості для здійснення різноманітних технологічних операцій. Вони дозволяють автоматизувати різні виробничі процеси, підвищити продуктивність праці, забезпечити високу точність операцій та звільнити людину від монотонної і фізично важкої роботи в небезпечних умовах [1, 2]. Маніпулятори є основною частиною промислових роботів та являють собою керовані механічні руки, здатні відтворювати деякі рухові функції людської руки при переміщенні об'єктів у просторі. Використання промислових маніпуляторів забезпечує такі переваги:

- підвищення продуктивності технологічних процесів;
- покращення якості продукції;
- зниження частки ручної праці;
- можливість роботи у шкідливих для людини умовах;
- зниження відсотку браку;
- підвищення коефіцієнту використання технологічного обладнання.

Для модернізації було обрано маніпулятор M20П.40.01 [3]. Він являє собою шестиосовий промисловий робот артикульованого типу, розроблений для виконання складних просторових рухів з високою точністю. Кінематична схема маніпулятора побудована за принципом послідовного з'єднання ланок, де кожна наступна ланка приєднується до попередньої через обертальний кінематичний зв'язок. Така конструкція забезпечує шість ступенів свободи, що дозволяє досягти будь-якої точки в робочому просторі з необхідною орієнтацією робочого органу. Загальний вигляд маніпулятора наведено на рис. 1.

У сучасних умовах автоматизації виробничих процесів роботизовані системи відіграють ключову роль у підвищенні продуктивності, точності та безпеки праці. Особливо актуальним є впровадження систем керування на базі ПЛК (програмований логічний контролер), які забезпечують гнучкість, надійність та простоту інтеграції в промислові процеси. Робота над керуванням маніпулятором за допомогою ПЛК *Siemens S7-1500* дозволяє отримати практичні навички програмування, розробки алгоритмів керування та проектування автоматизованих систем.

Для реалізації системи автоматизованого керування роботом-маніпулятором було обрано програмований логічний контролер *Siemens SIMATIC S7-1500*, модель *CPU 1511T-1 PN*. Цей контролер належить до серії технологічних (Т-серія), що спеціалізується на задачах керування рухом – саме таких, які характерні для маніпуляторів: координоване позиціонування, синхронізація осей, робота з енкодерами тощо.

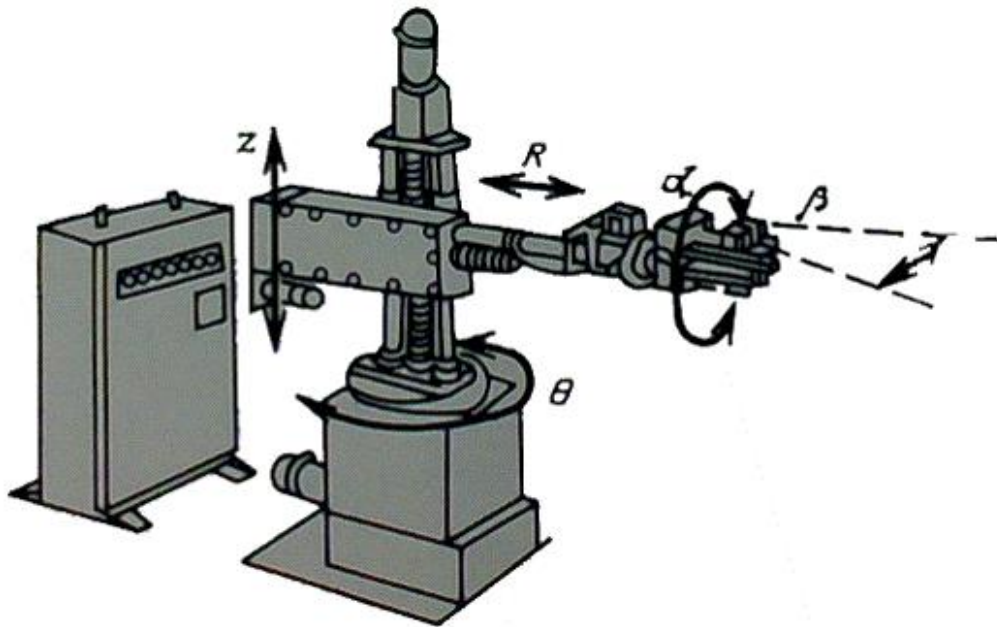


Рисунок 1 – Загальний вигляд маніпулятора

Використання ПЛК *Siemens SIMATIC S7-1500* у системі керування маніпулятором M20П.40.01 дозволяє реалізувати надійне, гнучке та зручне керування, забезпечуючи швидку діагностику та простоту налаштування системи. Інтуїтивно зрозуміла передня панель підвищує ефективність роботи персоналу та сприяє оперативному усуненню можливих збоїв у роботі обладнання.

Основний алгоритм керування (рис. 2) маніпулятором побудований з урахуванням поетапного виконання логіки – від початкового завантаження програми до завершення робочого циклу або переходу в режим очікування. Програма реалізована у середовищі *TIA Portal* із використанням структурованих блоків функціональної логіки (*Function Blocks*), що дозволяє забезпечити модульність, повторне використання коду та прозоре керування станами системи.

У автоматичному режимі запускається виконання попередньо запрограмованого циклу дій. Алгоритм передбачає поетапне керування осями маніпулятора відповідно до заданих координат або послідовностей. Програма формує сигнали напрямку та активації приводу кожної осі, контролюючи затримки між кроками через таймери. Після кожної дії система перевіряє стан відповідних кінцевих вимикачів, отримує зворотний зв'язок і переходить до наступного етапу тільки за умови правильного виконання попереднього. У разі збою активується процедура аварійної зупинки.

У ручному режимі логіка дозволяє оператору керувати кожною віссю окремо через НМІ. Натискання відповідної кнопки запускає конкретну дію – наприклад, переміщення вгору, вниз, вліво чи вправо. Тут діють ті ж самі перевірки на стан датчиків, що і в автоматичному режимі, але ініціація команд здійснюється вручну, без автоматичної послідовності.

Налаштувальний режим дає можливість перевірити роботу окремих елементів системи, зокрема блоків приводів, стану входів/виходів, таймерів та лічильників. Він використовується при тестуванні нових алгоритмів, налагодженні програми або діагностиці несправностей.

Код програми, розроблений для реалізації системи автоматичного керування роботом-маніпулятором, написаний мовою релейно-контактної логіки (*LD – Ladder Diagram*). Дана мова обрана з огляду на її зручність для візуального відображення логіки керування та сумісність із середовищем програмування контролера *Siemens S7-1500*. Структура коду відображає поділ на логічні функціональні блоки відповідно до структурованого алгоритму роботи системи.

На основі коду програми побудовано циклограму роботи маніпулятора, яка графічно демонструє взаємозв'язок між сигналами керування (командами) та сигналами зворотного зв'язку (датчиками) у часі. Циклограма показує логіку виконання кроків автоматичного циклу: подача команди, досягнення положення, обертання, повернення у початкову точку, підготовка до нового циклу. Це дозволяє наочно відслідковувати поведінку системи і є важливим елементом документування логіки роботи. Циклограма роботи наведена на рис. 3.

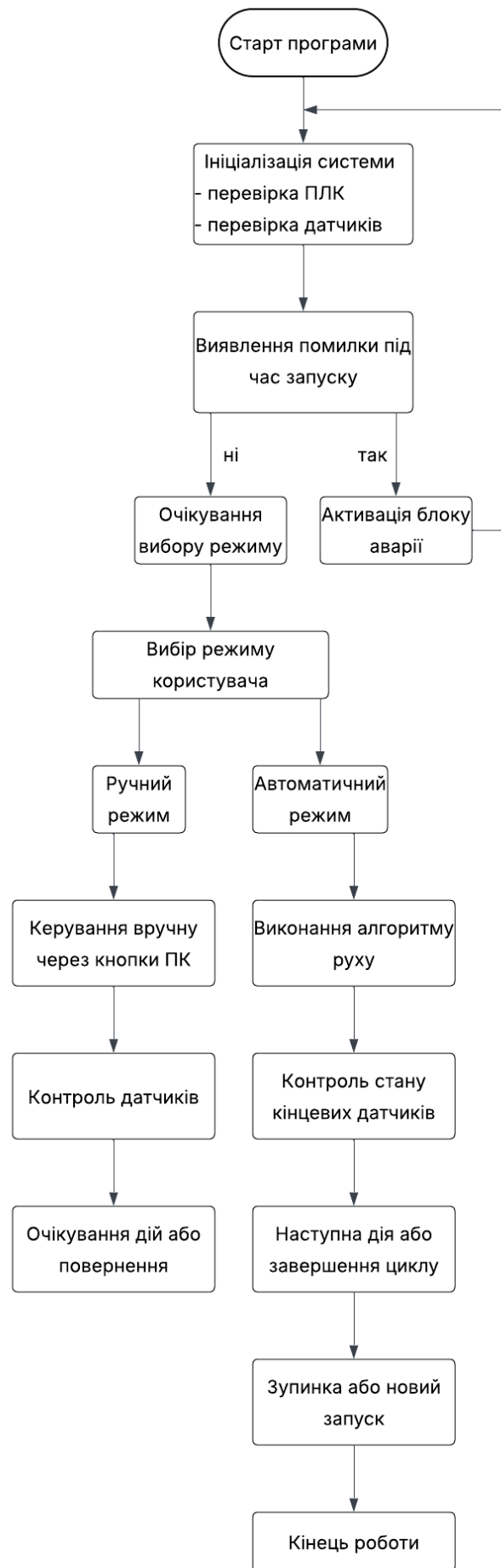


Рисунок 2 – Основний алгоритм роботи

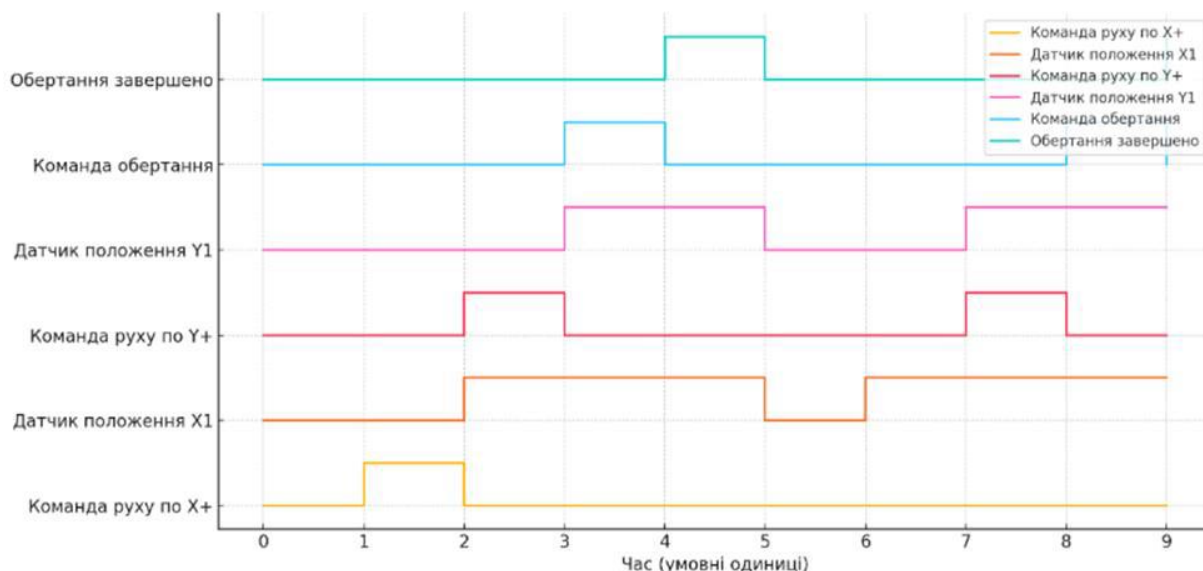


Рисунок 3 – Циклограма роботи маніпулятора

**Висновок.** В роботі було розроблено та впроваджено повноцінну програмну модель автоматизованої системи керування на базі програмованого логічного контролера *Siemens S7-1500*. Об'єктом дослідження виступав робот-маніпулятор типу M20П.40.01. Предметом дослідження стала розробка алгоритмічної та програмної частини системи керування, без апаратної реалізації. В роботі було аргументовано вибір контролера *Siemens S7-1500*, як оптимального рішення для керування маніпулятором завдяки його високій надійності, гнучкості програмування та підтримці мов стандарту *IEC 61131-3*.

Було розроблено основний алгоритм керування, алгоритми підпрограм та повний код програми мовою *LD* з використанням релейно-контактної логіки. Створено окремі блоки для ініціалізації, вибору режиму, автоматичного циклу, ручного керування, аварійного реагування, а також візуалізації стану системи. Для наочного представлення динаміки роботи системи побудовано циклограму, яка відображає взаємодію між командами управління та зворотними сигналами датчиків у часі.

Розроблена система забезпечує:

- безпечний запуск і завершення циклів;
- реагування на критичні ситуації в режимі реального часу;
- гнучке перемикання між режимами (авто, ручний, налаштування);
- зручне візуальне представлення інформації для оператора.

Отримані результати підтверджують працездатність і правильність обраної концепції побудови автоматизованої системи, а також можуть бути використані як основа для подальшої практичної реалізації в навчальному процесі або в промислових задачах.

#### Список використаних джерел

1. Павленко І.І. Промислові роботи та маніпулятори: підручник. Київ: Наук. думка, 2021. 382 с.
2. Craig J.J. Introduction to Robotics: Mechanics and Control. 4th ed. London: Pearson, 2022. 408 p.
3. Робот. (2015, January 24). \*Промисловий робот M20П.40.01\*. 4ertim.com. Retrieved November 24, 2025, from <https://4ertim.com/drawing/promisloviy-robot-m20p4001.html>
4. Siemens AG. (2025). \*SIMATIC product information: SIMATIC S7-1500 data\* (Document ID: 109994590). Siemens Industry Support. Retrieved November 24, 2025, from <https://support.industry.siemens.com/cs/document/109994590/simatic-product-information-simatic-s7-1500-data?dti=0&lc=en-WW>
5. Білюк І. С., Гаврилов С. О., Савченко О. В. та ін. (2022). Аналіз динаміки системи керування робота-маніпулятора.

## УДК 681.5

Савченко О. В.; Білюк І. С., к.т.н.; Шамраєв В. В.; Заворотний А. О.

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв

## МОСТОВИЙ БЛОК ЖИВЛЕННЯ ДЛЯ СИСТЕМ АВТОМАТИКИ

Одним з важливих елементів систем автоматики являється блок живлення, який забезпечує передачу потужності з заданими параметрами та має вбудовані захисти від перенапруги, перевантаження та перегріву. Основною задачею роботи є проектування блоку живлення з силовим трансформатором на тороїдальному магнітопроводі, мостовою схемою включення силових транзисторів та забезпеченням плавного пуску.

Імпульсні блоки живлення в системах автоматики забезпечують високу ефективність, стабільність роботи і компактність при змінних навантаженнях, особливо де потрібна висока продуктивність та компактність розмірів. Особливо доречні блоки живлення з мостовою схемою включення силових транзисторів. Вони мають наступні переваги:

- високий ККД, який може досягати 95 %;
- невеликі габарити та вага;
- широкий діапазон вхідних напруг;
- висока вихідна потужність;
- зниження пульсацій вихідної напруги;
- висока термостабільність.

Імпульсні мостові блоки живлення підходять для живлення потужних електроприводів і контролерів, а також системах керування з нелінійним коригувальним пристроєм, де забезпечують стабільні параметри при різких змінах навантаження. Імпульсні блоки живлення можна використовувати в нелінійних системах керування [2].

Для проектування блоку живлення було обрано драйвер *IRS2453D* [1], що дозволило мостове підключення силових транзисторів. Функціональна схема драйвера наведена на рис. 1.

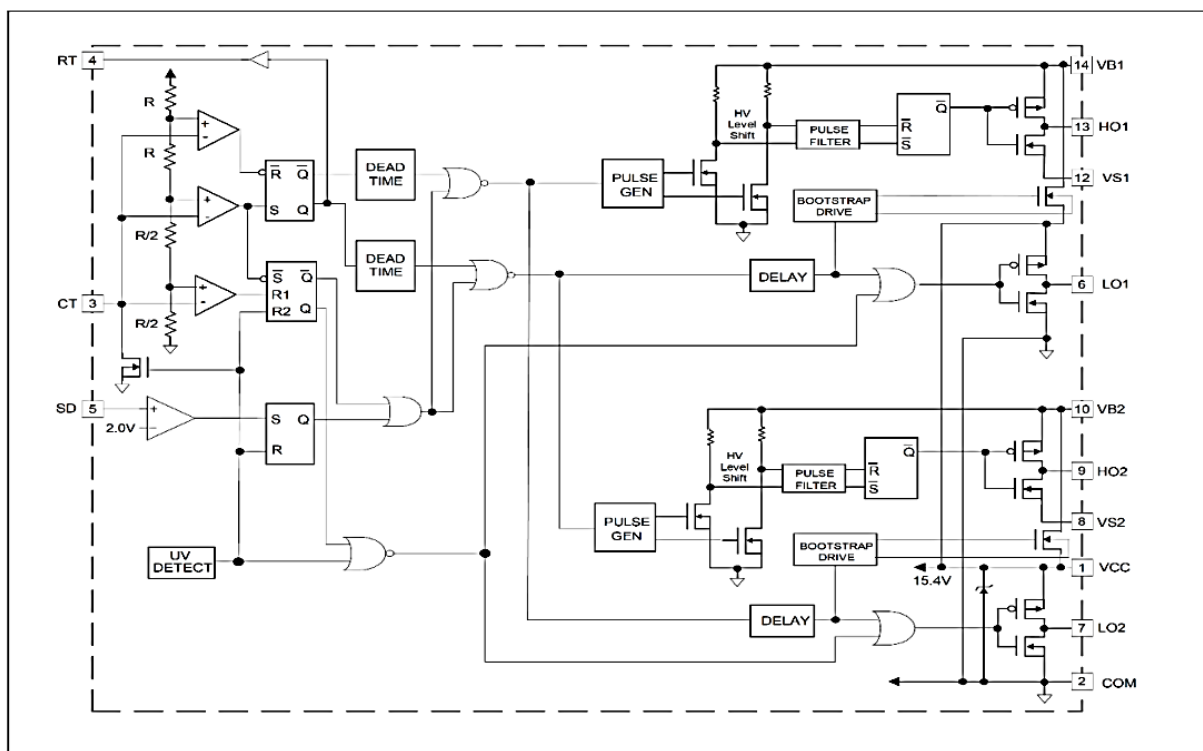


Рисунок 1 – Функціональна схема драйвера *IRS2453D*

Принципова схема блоку живлення показана на рис. 2, де показані вхідні та вихідні діодні мости з фільтрами, керуючий драйвер, силовий трансформатор, блок захисту за струмом та схема плавного пуску. При підключенні блоку живлення в мережу, струм обмежується резистором *R5*, через який заряджаються ємності *C1*, *C2*, і, коли зарядка завершується та струм живлення знижується до номінального значення, проходить замикання

контактів реле *Rel1* і вони шунтують резистор *R5*, тим самим запускаючи блок живлення на повну потужність. В схемі використаний блок захисту за струмом, який реалізовано [3] на транзисторі *VT1* та резисторі *R3*, що служить датчиком струму. У разі перевищення допустимого струму збільшується напруга на резисторі *R3* та відкриває транзистор *VT1*, який шунтує вивід *SD* міросхеми *IC2* на землю, і це приведе до зупинки роботи мікросхеми та закриттю силових транзисторів [3].

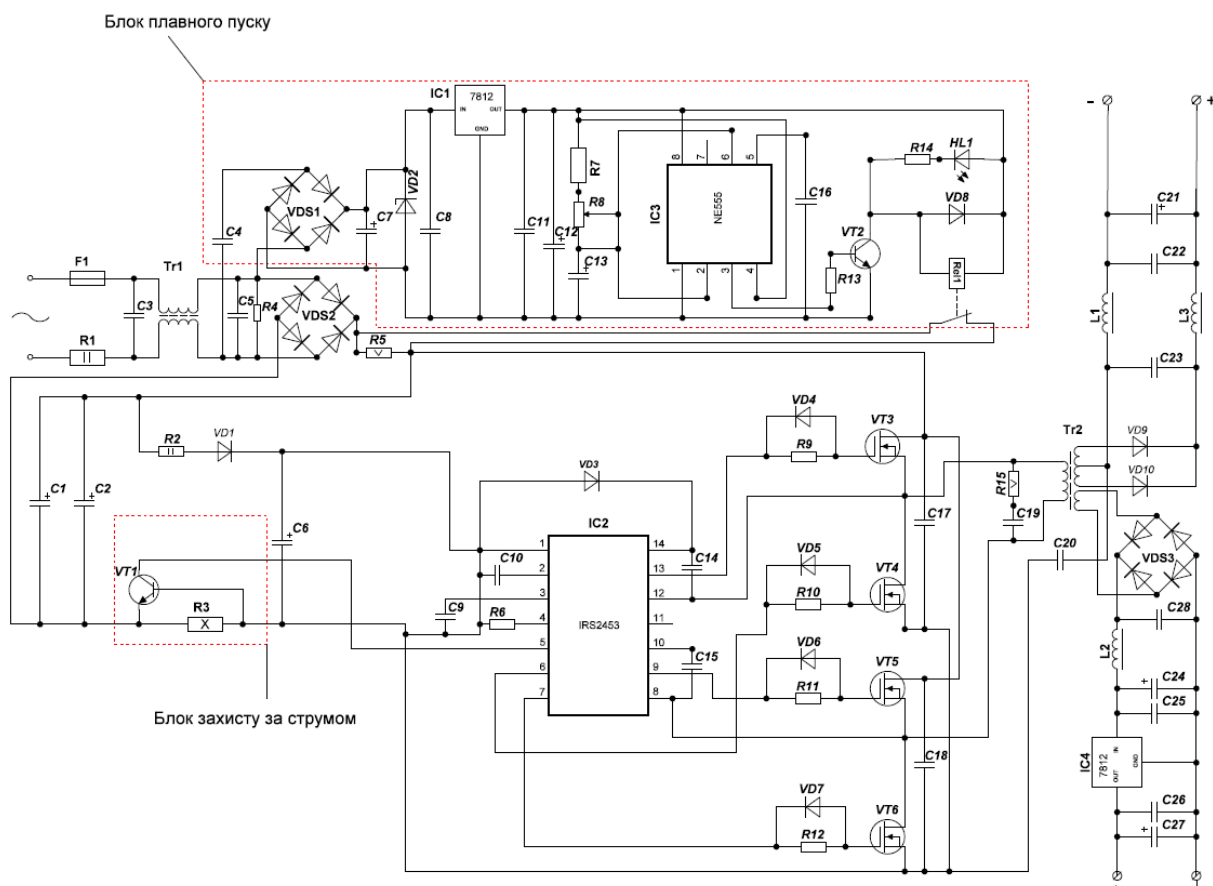


Рисунок 2 – Принципова схема блоку живлення

Силовий трансформатор імпульсного блоку живлення систем автоматики виконаний на тороїдальному магнітопроводі з робочою частотою 50 кГц. Після розрахунку були отримані параметри трансформатора, які зведено в табл. 1 [6].

Таблиця 1 – Параметри тороїдального трансформатора

| $K_{зс}$ | $K_{ок}$ | $j$            | $P_1$ | $S_c$             | $S_{ок}$              | $W_1$  | $W_2$  | $W_3$ | $S_1$                 | $S_2$               | $S_3$               | B    | $\eta_0$ |
|----------|----------|----------------|-------|-------------------|-----------------------|--------|--------|-------|-----------------------|---------------------|---------------------|------|----------|
| 0,6      | 0,35     | $5 \cdot 10^6$ | 2523  | $2 \cdot 10^{-4}$ | $7.069 \cdot 10^{-4}$ | 105.98 | 15.441 | 3.86  | $1.161 \cdot 10^{-6}$ | $1.6 \cdot 10^{-6}$ | $2.4 \cdot 10^{-5}$ | 0,17 | 0,5      |

Імпульсний блок живлення налаштований на промислову частоту 50 Гц і легко інтегрується в системи автоматики [4, 5].

**Висновок.** В роботі було спроектовано схему імпульсного блоку живлення з мостовою схемою підключення силових транзисторів та використанням тороїдального силового трансформатора. Для стабільної роботи при пуску блоку живлення використано схему плавного пуску, що знизило кидки струму при увімкненні, а також зменшило електромагнітні вади. Також було додано блок захисту за струмом, що дозволило захистити блок живлення від перевантажень.

#### Список використаних джерел

- 1 Datasheet, IRS2453D 600 V full-bridge gate driver IC with oscillator, integrated bootstrap FET, and shutdown / International Rectifier: 2016. – 18p.
- 2 Скін-ефект. Вікіпедія // Режим доступу: – <https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%BA%D1%96%D0%BD-%D0%B5%D1%84%D0%B5%D0%BA%D1%82>

- 3 Simple Induction Heater Circuits – Hot Plate Cookers // Режим доступу: – <https://www.homemade-circuits.com/simple-induction-heater-circuit-hot/>
- 4 Білюк І. С., Савченко О. В., Шарейко Д. Ю., Гаврилов С. О., & Фоменко А. М. (2021). Блок живлення систем автоматики. Trends in the scientific development, 2, 368.
- 5 Білюк І., Савченко О., Сургаєв А. та ін. Проектування імпульсного напівмостового блоку живлення. Scientific Collection «InterConf», (153), 353–356.
- 6 Білюк І. С., Савченко О. В., Шарейко Д. Ю. та ін. (2021). Блок живлення силових ланцюгів промислового устаткування. Problems of modern science and practice, 1, 439.

## СЕКЦІЯ 2. ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНІ КОМПЛЕКСИ, ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ І АПАРАТИ. ПІДВОДНА ТЕХНІКА І ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 621.314.6

Черчель С. Є., Овсянников В. М., к.т.н

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв

### УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ РЕЗЕРВНОГО ЖИВЛЕННЯ АПАРАТУРИ ГМСЗЛ НА БАЗІ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ LI-ION НАКОПИЧУВАЧІВ ТА ГІБРИДНОЇ ФІЛЬТРОКОМПЕНСУЮЧОЇ СИСТЕМИ

Забезпечення безперебійної та надійної роботи радіобудови ГМСЗЛ (Global Maritime Distress and Safety System) є критичною умовою для охорони людського життя на морі. Основна концепція ГМСЗЛ полягає в тому, що пошуково-рятувальні організації та інші судна повинні бути якнайшвидше сповіщені про лихо для координації рятувальної операції [2, 3].

На кожному судні повинен бути передбачений резервний джерело енергії для живлення радіоустановок, які забезпечують зв'язок при лихові, у разі виходу з ладу головного та аварійного джерел енергії [2, 4]. Вимоги до часу резервного живлення є жорсткими [5]:

1. Для суден, збудованих після 1 лютого 1995 року, або суден з аварійним джерелом енергії, що повністю відповідає вимогам, резерв забезпечується на одну годину [2, 4].

2. Для суден, де аварійне джерело енергії не передбачено або не відповідає всім вимогам, резерв повинен забезпечувати живлення протягом шести годин [4, 5, 6].

До обладнання, що повинно живитися від резервного джерела, входять: УКХ радіоустановка з ЦИВ [7], основний засіб радіозв'язку для даного району (ПВ, ПВ/КВ або Inmarsat), приймач для прийому інформації по безпеці мореплавання (НАВТЕКС, РГВ), а також лампочка аварійного освітлення [2].

Традиційно в якості резервного джерела живлення використовуються свинцево-кислотні акумулятори [4]. Однак, зростаючі вимоги до надійності, компактності, зменшення ваги та необхідність забезпечення високої якості електроенергії для чутливої радіоелектроніки (наприклад, приймачів НАВТЕКС, УКХ/ПВ/КВ радіоустановок) вимагають пошуку нових, більш ефективних рішень [8, 9].

**Метою роботи** є розробка концептуальної моделі модернізованої системи резервного живлення апаратури ГМСЗЛ на базі новітніх технологій акумуляторів та інтелектуального управління, що забезпечить підвищення надійності та відповідність стандартам EMC і ЯЕ.

#### **Вимоги до резервного живлення ГМСЗЛ та проблеми традиційних систем.**

Згідно з вимогами, ємність акумуляторних батарей повинна бути не менше електричної ємності, достатньої для живлення необхідного обладнання протягом 1 або 6 годин. При розрахунку ємності акумуляторної батареї враховується коефіцієнт 1,4, що враховує зниження ємності в процесі експлуатації, та коефіцієнт 1,25, що враховує температурні умови [2, 4].

#### **Основні проблеми традиційних систем:**

1. Низька питома енергоємність: Свинцево-кислотні акумулятори (які використовуються на судні для резерву) мають відносно низьку питому енергоємність, що призводить до великих габаритів та ваги.

2. Якість електроенергії (ЯЕ) та EMC: Сучасне радіобудування ГМСЗЛ, включаючи УКХ радіоустановки, потребує захисту від шкідливих перешкод електричного або іншого джерела. Навіть високопотужні системи бездротової зарядки (СБЗ) на судах створюють гармонічні спотворення, які можуть значно погіршити ЯЕ мережі [10]. Для радіоприймальної апаратури необхідно забезпечувати безперервність екранування кабельної мережі та приміщень для мінімізації впливу.

3. Контроль та обслуговування: Резервний джерело живлення (акумулятори) вимагає щоденної перевірки за показаннями вольтметра та щотижневої перевірки ареометром (рівень та щільність електроліту). Такий ручний контроль є вразливим до людського фактора і не забезпечує глибинного моніторингу стану батарей.

### Концепція інтелектуального Li-ion акумуляторного модуля

Для подолання цих недоліків пропонується впровадження резервних акумуляторних батарей на основі літій-іонної (Li-ion) технології, оскільки вона має найвищу щільність енергії серед усіх типів акумуляторів [1, 5].

Ключовим елементом системи є інтелектуальний зарядний пристрій, який використовує систему SMART BMS (Battery Management System). SMART BMS виконує функції:

- Моніторинг: контролює процес зарядки, стежить за параметрами кожної комірки та балансує їх. Це дозволяє не лише забезпечити безпечну експлуатацію акумуляторів, але й надає повну інформацію про технічний стан батареї, замінюючи частково щоденні та щотижневі перевірки, вимагаючи при цьому мінімального втручання людини.

- Захист: запобігає виходу за межі робочих напруг як усієї батареї, так і кожної окремої паралелі [1].

- Віддалене керування: SMART BMS може мати можливість під'єднання через Bluetooth до смартфона для відображення всіх параметрів акумулятора. Хоча бездротовий зв'язок (Bluetooth або WiFi) може не використовуватися для керування у режимі лиха (для дотримання режиму радіотиші), він є важливим для віддаленого контролю та адміністрування системи живлення в нормальних умовах.

Запропонований інтелектуальний зарядний пристрій має універсальну архітектуру, яка дозволяє заряджати батареї як від стаціонарної мережі змінного струму (220В), так і від автономного джерела постійної напруги (наприклад, 12-14.4В від іншого акумулятора або автомобіля). Для цього використовується знижувально-підвищувальний (BUCK-BOOST) DC-DC перетворювач, який забезпечує високий ККД (до 95 %) та може працювати, коли вхідна напруга вища, нижча або дорівнює вихідній [8].

### Забезпечення електромагнітної сумісності за допомогою гібридного КФКП

Оскільки апаратура ГМСЗЛ є критично важливою для безпеки, забезпечення електромагнітної сумісності (ЕМС) та Якості електроенергії (ЯЕ) має найвищий пріоритет. Навіть при використанні власних зарядних пристроїв, необхідно, щоб вони не створювали перешкод для чутливого радіообладнання.

Для потужних систем, які використовують вхідні некеровані випрямлячі (НВ), виникає проблема значних гармонічних спотворень. Наприклад, коефіцієнт гармонічних спотворень напруги ( $\gamma$ ) не повинен перевищувати 5% згідно з міжнародними стандартами (наприклад, IEC 6100-4-30 та IEC 60092-101) [2].

Пропозиція "новинки": Інтеграція системного гібридного керованого фільтрокомпенсуючого пристрою (КФКП) в ланцюг живлення зарядного пристрою.

Дослідження показали, що використання економічного 6-пульсного НВ у поєднанні з системним КФКП є більш ефективним рішенням порівняно з використанням 12-пульсного НВ без додаткових засобів компенсації.

КФКП, що має удосконалену дволанкову гібридну структуру, налаштовується на компенсацію 5-ї та 7-ї гармонік. Таке рішення дозволяє забезпечити стандартні вимоги до ЯЕ, знижуючи THDU та THDI до 2.97 % і 2.48 % відповідно. Це забезпечує:

- Високу якість живлення: мінімізація гармонічних спотворень, що генеруються зарядним пристроєм, гарантує стабільну роботу радіообладнання ГМСЗЛ.

- Компенсація реактивної потужності: КФКП одночасно повністю компенсує реактивну потужність, що підвищує загальну енергоефективність суднової електромережі, від якої живиться зарядний пристрій.

- Енергоефективність: рішення з 6-пульсним НВ та КФКП забезпечує більшу ефективність при меншій вартості, ніж варіант із 12-пульсним НВ [8].

### Модернізована система резервного живлення ГМСЗЛ

Модернізована система резервного живлення апаратури ГМСЗЛ на барі інтелектуальних накопичувачів та гібридної фільтрокомпенсуючої системи поєднує переваги високої енергоемності та інтелектуального контролю з необхідною ЯЕ та ЕМС [1, 5, 9].

Таблиця 1 – Роль модернізованих компонентів у системі

| Компонент системи                    | Роль у підвищенні надійності та безпеки                                                                                                                        |
|--------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Li-ion Акумуляторна Батарея</b>   | Висока питома енергоемність забезпечує виконання вимог щодо резервного часу роботи (1/6 год) при мінімальних габаритах та вазі.                                |
| <b>SMART BMS</b>                     | Забезпечує постійний автоматичний моніторинг, балансування та безпечну експлуатацію батареї, замінюючи ручні, схильні до помилок, щоденні/щотижневі перевірки. |
| <b>DC-DC BUCK/BOOST Перетворювач</b> | Забезпечує гнучкість та високий ККД заряджання (до 95%) від різних суднових чи автономних джерел живлення.                                                     |
| <b>Гібридний КФКП</b>                | Забезпечує ЕМС та ЯЕ, знижуючи гармонічні спотворення ( $THD < 5\%$ ), що є критично важливим для чутливого радіообладнання ГМСЗЛ.                             |

Впровадження Li-ion акумуляторів вимагає особливої уваги до їх теплового режиму та управління. На прикладі модернізації АІС-станції, було показано необхідність додавання системи охолодження/примусової вентиляції для забезпечення надійного функціонування електронних компонентів за підвищених температур. Аналогічні системи повинні бути інтегровані і в Li-ion модуль, щоб гарантувати стабільну роботу BMS та акумуляторів у жорстких суднових умовах.

#### Висновки

Вимоги ГМСЗЛ до резервного електроживлення (1 або 6 годин, залежно від судна) можуть бути найбільш ефективно виконані шляхом переходу від традиційних свинцево-кислотних акумуляторів до високоенергоємних літій-іонних батарей. Запропонована концепція інтелектуального акумуляторного модуля з інтегрованою системою SMART BMS значно підвищує надійність резервного живлення ГМСЗЛ. BMS забезпечує постійний моніторинг і безпечну експлуатацію, автоматизуючи щоденні та щотижневі перевірки резервного джерела. Для забезпечення електромагнітної сумісності та відповідності жорстким міжнародним стандартам Якості електроенергії (ЯЕ) пропонується інтегрувати зарядний пристрій з гібридним керованим фільтрокомпенсуючим пристроєм (КФКП). Це рішення дозволяє ефективно мінімізувати гармонічні спотворення (знижуючи THDU до 2.97 %), що є критичним для радіонавігаційного обладнання.

Таким чином, модернізована система, що поєднує високу питому енергоємність, інтелектуальне управління BMS та активну компенсацію гармонік за допомогою КФКП, є новою технічною пропозицією, що забезпечує не лише виконання мінімальних вимог ГМСЗЛ, але й багаторазово підвищує загальну надійність та безпеку морської системи зв'язку [6, 9].

#### Список використаних джерел

1. BU-304: Why Lithium-ion Needs Protection. *Battery University*.
2. IEC 60092-101: Electrical installations in ships – Part 101: Definitions and general requirements.
3. International Maritime Organization (IMO). SOLAS Convention, Chapter IV: Radio communications.
4. ITU-R M.493: Digital selective-calling system for use in the maritime mobile service.
5. IACS Unified Requirement E24: Onboard use of Accumulator Batteries.
6. BU-409: Charging Lithium-ion.
7. GLOBAL MARITIME DISTRESS AND SAFETY SYSTEM (GMDSS) Guide for CG Marine Inspectors & Port State Control Examiners.
8. M. D. Galankin, V. V. Zaytsev. Advanced Battery Management Systems for Electric Vehicles and Marine Applications: Review. *Journal of Electrical Engineering and Technology* (2022).
9. H. H. Lee, H. J. Lee. Harmonic Minimization and Power Factor Correction in Marine Power Systems using Hybrid Active Power Filters. *IEEE Transactions on Power Electronics* (2019).
10. G. Guidi, J. A. Suul, F. Jensen, and I. Sørffonn. Wireless Charging for Ships: High-power inductive charging for battery electric and plugin hybrid vessels.

УДК 621.314.6

Чернов І. М., Овсянников В. М., к.т.н.

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв

## ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРИ ТРЕНАЖЕРНОГО ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ПІДГОТОВКИ ОПЕРАТОРІВ ГЛОБАЛЬНОЇ МОРСЬКОЇ СИСТЕМИ ЗВ'ЯЗКУ У ВИПАДКУ ЛИХА ТА ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗПЕКИ (ГМСЗЛБ)

**Вступ.** На сьогодні практично всі судна, обладнані апаратурою ГМСЗЛБ, тому виключно усі судноводії повинні мати дипломи операторів ГМСЗЛБ. Завжди один із помічників капітана призначається відповідальним за забезпечення радіозв'язку та ведення відповідної документації. Дана функція, як правило, покладається на другого помічника капітана [1, 2, 3].

Кожен судноводій обов'язково повинен мати робочий диплом оператора ГМСЗЛБ. Також робочий диплом ГМСЗЛБ входить до переліку обов'язкових документів для отримання робочого диплома штурмана, старшого помічника, капітана [1, 2, 3].

Система ГМСЗЛБ дозволяє ефективно долати перешкоди, до яких схильні радіохвилі (загасання зі збільшенням відстаней, погода та інші причини перешкод) завдяки застосуванню наземного, корабельного та

супутникового способів зв'язку. Це дозволяє передавати сигнали лиха на великі відстані в автоматичному режимі, що дозволяє отримувати пошуково-рятувальним загонам і службам.

За допомогою ГМСЗЛБ відбуваються оперативні оповіщення про лихо із зазначенням точних координат. Інформація надходить до рятувальних груп у районі лиха, що дозволяє їм надавати скоординовану оперативну допомогу. Технічне функціонування ГМСЗЛБ на землі забезпечується станціями системи британської компанії супутникового зв'язку Inmarsat на березі та радіостанціями. Інформація оперативна передається пошуково-рятувальним групам і судам, що у конкретний час у районі місця аварійної ситуації.

Основною функцією ГМСЗЛБ [1–4] є оперативне повідомлення про лихо всіх служб у районі його виникнення, що дозволяє координувати дії щодо порятунку та організовувати процес без зайвих тимчасових витрат. Система здатна також забезпечити кращий зв'язок у звичайних умовах, що є корисним для підвищення якості навігації. В результаті застосування ГМСЗЛБ, судна в фактично будь-якому районі свого місцезнаходження забезпечують стійкий зв'язок у будь-який час.

**Основна частина.** З метою належного використання Обладнання для проведення якісної підготовки відповідно до міжнародних та національних вимог навчальний заклад повинен мати необхідне кадрове та навчально-методичне забезпечення [3]. Процес підготовки, яка проводиться за допомогою Обладнання, повинен бути охоплений впровадженою системою управління якістю відповідно до розділу А-І/8 Кодексу ПДНВ, сертифікованою органом із сертифікації, призначеним відповідно до чинного законодавства України на виконання робіт із сертифікації систем управління якістю [2].

Процедури системи управління якістю повинні містити опис усього процесу підготовки, починаючи з моменту прийому слухачів на курс підготовки та закінчуючи видачою документального доказу підготовки (свідоцтва) і збереженням даних про проходження підготовки [2].

#### **Вимоги до тренажерного обладнання підготовки операторів ГМСЗЛБ [2, 3, 4]**

Тренажерне обладнання, яке використовується під час підготовки, повинно відтворювати реальне спорядження та обладнання, що використовуються на судах. Крім того, тренажерний центр має містити робочі місця інструктора та двох і більше робочих місць слухачів – операторів ГМСЗЛБ (далі – оператори), об'єднаних у єдину комп'ютерну мережу.

#### **Імітування реальних випадків небезпеки на тренажерному обладнанні [3]**

Тренажерне обладнання повинно імітувати:

- 1) функції реальних засобів зв'язку суднового та берегового базування: берегові та суднові радіостанції, берегові земні станції (БЗС), рятувальна-координаційні центри (РКЦ), станції НАВТЕКС; параметри цих станцій (назви, позивні сигнали, ідентифікаційні номери цифрового вибіркового виклику (ЦВВ), селективні коди радіотелексу вузько смугового літеродрукування (ВЛД), ідентифікаційні номери ІНМАРСАТ-В, ІНМАРСАТ-С або інших станцій ІНМАРСАТ, схвалених для ГМСЗЛБ, координати, види сервісу, частоти, які використовуються, повинні відповідати параметрам реальних станцій і допускати корективи;
- 2) процедури радіозв'язку МРС з використанням ЦВВ, а саме:
  - у напрямку судно-судно між робочими місцями операторів;
  - у напрямку судно-берег і берег-судно в автоматичному режимі або між робочими місцями операторів і місцем інструктора (за участю інструктора);
  - ведення літеродрукувального обміну із зареєстрованими у програмі тренажера абонентами через берегові та берегові земні станції в автоматичному режимі;
- 3) радіообмін у режимі радіотелефонії (РТ) і в режимі вузькосмугового літеродрукування (ВЛД):
  - у напрямку судно-судно між робочими місцями операторів;
  - у напрямку судно-берег та берег-судно між робочими місцями операторів та місцем інструктора (за участю інструктора);
- 4) наявність фонових шумів у РТ-режимі;
- 5) тестові перевірки та роботу аварійного радіобуя (далі – АРБ), радіолокаційного відповідача (далі – РЛВ) і портативної ультракороткохвильової (далі – УКХ) апаратури двостороннього РТ зв'язку;
- 6) радіозв'язок у МРС та МРСС для різних районів світового судноплавства;
- 7) умови проходження радіохвиль з використанням спрощеної моделі радіоканалу розповсюдження радіовипромінювань з урахуванням часу, сезону та відстані між станціями;
- 8) завади радіоприйому на робочих частотах і каналах у діапазонах УКХ, ПХ, КХ;
- 9) повні та часткові відмови основної апаратури радіозв'язку в МРС і МРСС;
- 10) процедури радіозв'язку МРСС з використанням супутникової апаратури, а саме: передавання викликів та повідомлень з пріоритетом лиха;
  - обмін повідомленнями зі звичайним пріоритетом;

11) передавання інформації щодо безпеки на морі мережею SafetyNET у райони НАВАРЕА/МЕТАРЕА, а також у географічні райони через визначені координуючі станції мережі (КСМ) океанських районів ІНМАРСАТ;

12) передавання інформації щодо безпеки на морі через радіостанції НАВТЕКС на частотах 518, 490 та 4209,5 кГц і через радіостанції ВЛД ІБМ на КХ.

**Забезпечення тренажерного обладнання ГМСЗЛБ [5, 6]**

Тренажерне обладнання ГМСЗЛБ повинно забезпечувати [4]:

- можливість друку або віртуального друку прийнятих і переданих викликів, повідомлень та іншої інформації відповідно до алгоритмів роботи устаткування, що імітується;
- можливість редагування сформованого списку доступних берегових і суднових абонентів;
- збереження в електронній базі даних радіостанцій, телексивних і телефонних номерів абонентів берегових мереж, які імітуються на тренажерному обладнанні;
- збереження налаштувань устаткування ГМСЗЛБ (адресні книги, електронні журнали, канали користувача тощо) та текстів прийнятих і переданих документальних повідомлень кожного робочого місця оператора при завершенні роботи;
- відповідність форматів текстів інформації щодо безпеки на морі (ІБМ), які зберігаються в базі даних та передаються в автоматичному режимі, форматам текстів ІБМ, що дійсно використовуються, та можливість коригування їх інструктором;
- виконання правил мережі НАВТЕКС у частині передавання повідомлень щодо безпеки на морі через відповідні берегові радіостанції системи НАВТЕКС.

На всі практичні вправи, які відпрацьовуються на тренажерному обладнанні, кожен слухач має бути забезпечений пояснювальним матеріалом.

Під час використання тренажерного обладнання повинні виконуватися встановлені вимоги щодо техніки безпеки.

**Вимоги до робочого місця інструктора [6, 7]**

Влаштування робочого місця інструктора:

1. Робоче місце інструктора на тренажерному обладнанні повинно бути обладнане комп'ютером з програмним забезпеченням, яке дозволяє імітувати функції радіоустаткування берегової радіостанції або рятувально-координаційного центру та керувати роботою тренажера взагалі або є набором імітаторів берегового та судового устаткування радіозв'язку, які доповнені засобами керування тренажером.
2. Робоче місце інструктора повинно мати засоби забезпечення відображення і зберігання інформації про прийняті та передані виклики, повідомлення, іншої інформації відповідно до алгоритмів роботи устаткування, що імітується.
3. Робоче місце інструктора повинно забезпечувати виконання таких функцій:
  - оперативну зміну місця розташування суден, що моделюються на робочих місцях;
  - відображення місць розташування радіостанцій, що імітуються на тренажері, переміщення суден, які моделюються на робочих місцях операторів, збереження у файлах на магнітних носіях поточного розташування суден;
  - керування станом устаткування на робочих місцях операторів;
  - вибір станцій, що передають інформацію щодо безпеки на морі, завдання районів НАВАРЕА/МЕТАРЕА, прямокутних і кругових географічних районів, типів повідомлень і часу їх передачі;
  - можливість імітації передавання повідомлень для обладнання НАВТЕКС на будь-якій із трьох частот: 518, 490, 4209,5 кГц;
  - фіксацію на екрані робочого місця інструктора, і/або у відповідних електронних журналах, і/або у роздрукованому вигляді стану і параметрів налагодження радіоустаткування на робочих місцях операторів;
  - фіксацію на екрані робочого місця інструктора, і/або у відповідних електронних журналах, і/або у роздрукованому вигляді текстів викликів і повідомлень, які передані операторами, із зазначенням часу передачі та відповідних параметрів (частоти, назви радіостанції тощо);
  - передавання викликів і повідомлень через системи зв'язку, які імітуються (ЦВВ, ВБД, супутникову систему ІНМАРСАТ), на адресу усіх суден або окремого судна;
  - передавання на окремі робочі місця операторів або на адресу всіх робочих місць ІБМ через станції КХ ВЛД і супутникову систему ІНМАРСАТ і текстових повідомлень, що можуть бути використані для постановки задачі оператору;
  - ведення РТ обміну з операторами на симплексних і дуплексних каналах у діапазонах УКХ, ПХ, КХ;
  - прослуховування РТ обміну окремого оператора або групи операторів.

**Вимоги до робочого місця слухача [6, 7]**

Влаштування робочого місця слухача:

1. Робоче місце слухача (оператора) повинно бути обладнане комп'ютером, програмне забезпечення якого імітує суднове радіоустаткування ГМЗЛБ, або пультами, що імітують роботу суднового радіоустаткування ГМЗЛБ.
2. Робоче місце оператора повинно мати принтер або віртуальний принтер (реалізований програмно на екрані комп'ютера), який повинен забезпечувати друк або віртуальний друк (далі – друк) прийнятих і переданих викликів, повідомлень та іншої інформації відповідно до алгоритмів роботи устаткування, що імітується.

**Основні дії для навчання радіооператора ГМСЗЛБ [11 ].**

Робоче місце радіооператора на тренажерному обладнанні повинно відтворювати обладнання ГМСЗЛБ та забезпечувати як мінімум виконання таких дій:

**1) УКХ радіостанція:**

- включення, виключення та регулювання гучності;
- робота в режимі телефонії;
- регулювання шумоподавлювача;
- настроювання на міжнародні канали МРС;
- установка каналів, які використовуються у Сполучених Штатах Америки;
- несення вахти на двох каналах;
- перемикання вихідної потужності передавача між значеннями 25 Вт і 1 Вт.

**2) модем ЦВВ із приймачем 70 каналу** (залежно від устаткування, що імітується, може бути окремим пристроєм або входити до складу УКХ радіостанції):

- включення, виключення разом з УКХ радіостанцією;
- ручне та автоматичне (за участю інструктора) введення координат і часу;
- перегляд власних вибірових номерів ЦВВ: індивідуального та не менше ніж двох групових;
- несення вахти на каналі 70;
- підготовка, передавання та приймання викликів ЦВВ, необхідних для УКХ устаткування ЦВВ класу А;
- використання спеціальної кнопки або спеціальних кнопок для ініціалізації передавання виклику лиха;
- збереження та перегляд до 20 прийнятих викликів лиха та викликів, не пов'язаних з лихом;
- перевірка модема без випромінювання;
- друк прийнятих викликів;
- перевірка робочого стану радіостанції через другу радіостанцію.

**3) проміжна хвильова-короткохвильова (ПХ/КХ) радіостанція:**

- включення, виключення та регулювання гучності;
- ручне та автоматичне регулювання підсилення;
- настроювання частот приймача та передавача;
- використання стандартних каналів МСЕ;
- програмування власних каналів користувача;
- вибір режиму роботи (класу випромінювання);
- перемикання вихідної потужності передавача;
- настроювання станції на частоту 2182 кГц однією клавішею;
- робота в режимі телефонії, а також разом з модемом ЦВВ і телексом модемом.

**4) ПХ/КХ модем ЦВВ і скануючи приймач частот лиха** (залежно від устаткування, що імітується, може бути окремим пристроєм або входити до складу ПХ/КХ радіостанції):

- вмикання, вимикання разом з ПХ/КХ радіостанцією;
- ручне та автоматичне введення координат і часу;
- перегляд власних вибірових номерів ЦВВ: індивідуального та не менше ніж двох групових;
- несення вахти на частотах лиха та безпеки;
- підготовка, передавання та приймання усіх типів викликів ЦВВ, необхідних для ПХ/КХ устаткування ЦВВ класу А;

- використання спеціальної кнопки або спеціальних кнопок для ініціалізації передавання виклику лиха;
- подавання звукового сигналу тривоги;
- програмування сканування частот ЦВВ, не пов'язаних з лихом;
- збереження та перегляд до 20 прийнятих викликів лиха та викликів, не пов'язаних з лихом;
- перевірка модема без випромінювання та з випромінюванням;
- друк прийнятих викликів.

**5) ПХ/КХ телексом модем** (залежно від устаткування, що імітується, може бути окремим пристроєм або входити до складу ПХ/КХ радіостанції) і телексом термінал:

- включення, виключення разом з ПХ/КХ радіостанцією;
- передача та прийом повідомлень у режимах FEC Collective і FEC Selective;

- робота у режимі ARQ між суднами;
- виклик і робота з береговою радіостанцією у режимі відповідно до процедур Рекомендацій 492 та 625 МСЕ, що включає з'єднання та передачу повідомлень береговим телексом абонентам, прийом повідомлень щодо безпеки на морі на частотах КХ ВЛД;

- введення та редагування списку станцій;
- введення, збереження в довгостроковій пам'яті та редагування повідомлень;
- друк повідомлень.

6) устаткування НАВТЕКС (залежно від типу устаткування, що імітується, може бути одним пристроєм, що містить три приймачі на частоти 518, 490, 4209,5 кГц; або два чи три окремих приймачі):

- включення, виключення обладнання;
- програмування берегових станцій і типів повідомлень;
- можливість прийому повідомлень на частотах 518, 490, 4209,5 кГц;
- друк прийнятих повідомлень;
- контрольне роздрукування налагоджень;
- тестова перевірка;
- налагодження звукового сигналу при прийманні важливих повідомлень;
- очищення пам'яті налагоджень і повідомлень.

7) суднова земна станція ІНМАРСАТ (або інша СЗС системи ІНМАРСАТ, що схвалена для ГМЗЛБ):

- включення та виключення станції;
- ручне та автоматичне позиціонування антени та індикація рівня сигналу супутника;
- введення, збереження в довгостроковій пам'яті та редагування повідомлень;
- передавання повідомлень із пріоритетом лиха в режимах телекса та телефонії;
- передавання повідомлень з використанням двозначних кодів спеціальних служб (32, 38, 39, 42 і 91 як

мінімум) у режимах телекса та телефонії;

- зв'язок у напрямку судно-судно (між робочими місцями тренажера) у режимі телекса;
- зв'язок у напрямку судно-судно (між робочими місцями тренажера) у режимі телефонії (з використанням єдиного коду доступу «+870» для всіх океанських регіонів, а саме: AOR-E, AOR-W, IOR, POR);

- зв'язок у напрямку судно-берег і берег-судно (із зареєстрованими на тренажері береговими абонентами) у режимах телефонії та телекса;

- тестова перевірка станції;
- друк повідомлень;
- виведення на друк і/або дисплей оплачуваного часу;
- перегляд власного вибіркового номера;
- контроль кнопки DISTRESS.

8) суднова земна станція ІНМАРСАТ-С із приймачем розширеного групового виклику (РГВ):

- включення та виключення станції;
- ручне та автоматичне введення координат і часу;
- сканування океанських районів і реєстрація в мережі океанського району;
- вихід з мережі океанського району;
- індикація рівня прийнятого сигналу;
- введення, збереження в довгостроковій пам'яті та редагування повідомлень;
- редагування адресної книги;
- передавання повідомлення про лихо за допомогою спеціальних клавіш;
- передавання повідомлення про лихо із включенням до складу оповіщення про лихо та вибором берегової земної станції (БЗС);

- прийом підтвердження щодо одержання повідомлення про лихо;
- прийом повідомлень за допомогою мережі SafetyNET;
- передавання повідомлення з пріоритетом лиха;
- передавання повідомлень із використанням двозначних кодів спеціальних служб (32, 38, 39 і 42 як

мінімум);

- передавання та приймання повідомлень у напрямках судно-судно (між робочими місцями тренажера), судно-берег і берег-судно (із зареєстрованими на тренажері береговими абонентами з використанням служб Telex message, Fax message, Electronic mail);

- формування функції «Position report»;
- тестова перевірка станції;
- перегляд власного вибіркового номера;

- переведення станції у режим «прийом тільки повідомлень РГВ»;
- програмування приймача РГВ (зазначення додаткових районів НАВАРЕА/МЕТАРЕА, районів передавання прибережних повідомлень, прийом системних повідомлень);
- формування журналів переданих повідомлень, прийнятих повідомлень і повідомлень РГВ;
- друк повідомлень на принтері.

**9) аварійний радіобуй (АРБ) Коспас-SARSAT (або муляж цього устаткування):**

- відображення конструкції та маркування АРБ;
- ручне включення та виключення АРБ;
- тестова перевірка АРБ;
- візуальна індикація при включенні та тестуванні АРБ.

**10) радіолокаційний відповідач (РЛВ):**

- відображення конструкції та маркування РЛВ;
- ручне включення та виключення РЛВ;
- тестова перевірка РЛВ;
- візуальна індикація при включенні та тестуванні РЛВ.

**11) портативна УКХ радіостанція двостороннього радіотелефонного зв'язку рятувальних шлюпок і плотів (або муляж цього устаткування):**

- включення та виключення станції;
- регулювання гучності та шумоподавлювача;
- вибір не менше ніж 2 каналів, один з яких 16;
- зміна вихідної потужності передавача;
- оперативний вибір 16 каналу;
- ведення обміну в режимі РТ.

**12) портативна УКХ радіостанція двостороннього радіотелефонного зв'язку з авіаційними засобами (або імітація її на тренажері):**

- вмикання та вимикання станції;
- регулювання гучності та шумоподавлювача;
- вибір не менше 2 частот: 121,5 МГц та 123,1 МГц;
- світова сигналізація включення частоти 121,5 МГц.

**Забезпечення імітації устаткування тренажерного обладнання [8-11].**

Для забезпечення імітації (усього устаткування, що передбачено для реалізації концепції ГМСЗЛБ) у складі тренажера повинні імітуватися:

- функції устаткування, пов'язаного з апаратурою ГМЗЛБ, або такого, що є споживачем інформації ГМСЗЛБ, зокрема DGPS/GLONASS приймач;
- панель сигналів тривожної сигналізації (аларм-панель);
- панель контролю заряду акумуляторів;
- радіолокаційна станція (РЛС).

**Висновки:**

1. Тренажерне обладнання забезпечує імітацію реальних випадків небезпеки для судна.
2. Обладнання тренажерів влаштовано таким чином, щоб робоче місце інструктора-викладача охоплювало робочі місця студентів-слухачів навчання радіооператора ГМСЗЛБ.
3. Тренажерне обладнання складається з: УКХ радіостанції; модема ЦВВ із приймачем 70 каналу; проміжної хвильової / короткохвильової (ПХ/КХ) радіостанції; ПХ/КХ модема ЦВВ і скануючого приймача частот лиха; модема ЦВВ із приймачем 70 каналу; ПХ/КХ телексного модема; устаткування НАВТЕКС; суднової земної станції ІНМАРСАТ; суднової земної станції ІНМАРСАТ-С; аварійного радіобуя (АРБ) Коспас-SARSAT; радіолокаційного відповідача (РЛВ); портативних УКХ радіостанцій.

**Список використаних джерел**

1. <https://cruise-control.com.ua/doc/gmdss-globalnaya>.
2. <https://www.4594.com.ua/list/540290>
3. <https://zakon.rada.gov.ua>
4. <https://vspu.net/sit/index.php/sit/article/view>
5. <https://marad.gov.ua/storage/app/sites/ntz>
6. <https://ksma.ks.ua>
7. <https://alfa-training.com.ua/trenazherni-kompleksy>
8. <https://tcsavant.com/Курсы>

9. <https://flagman.education> › operator-hlobalnoi-morskoj-s...
10. <https://ksma.ks.ua> ›
11. <https://marad.gov.ua> › app › sites › uploaded-files
12. <https://vesti.in.ua> › poradi › gmdss-globalna-morska-siste

УДК 621.876.11

Чилий І. А., Бабкін Г. В., к.т.н.

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв

## ВДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ЛІФТОВОЇ ЛЕБІДКИ З ВИКОРИСТАННЯМ ВЕКТОРНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

Системи електроприводу підйомно-транспортних механізмів широко поширені в різних сферах промисловості та ЖКГ. Від надійної та якісної роботи ліфтових лебідок безпосередньо залежить безпечне та комфортне функціонування ліфтів, кранів та підйомників різного типу.

На сучасному етапі подальше вдосконалення систем електроприводу обґрунтовано підвищенням енергетичної ефективності, покращенням комфортності переміщень кабіни та зниженням експлуатаційних витрат.

При цьому на тлі досягнень у галузі електромоторобудування та силової електроніки на перший план виноситься завдання розробки векторних систем керування електроприводами ліфтових лебідок. Впровадження векторних систем управління дозволяє на новому рівні реалізувати вимоги до систем електроприводу ліфтових і підйомних механізмів.

Саме з цих причин проведення подальших досліджень у галузі розробки та вдосконалення векторних систем керування електроприводами ліфтових лебідок є перспективним та своєчасним. При потребах суспільного розвитку, що розширюються, потрібні безперервне вдосконалення засобів внутрішнього транспорту будівель і споруд із застосуванням сучасних науково-технічних досягнень.

За призначенням ліфти поділяються на різні категорії.

Мета роботи: розробка векторної системи керування електроприводом ліфтової лебідки пасажирського ліфта вантажопідйомністю 400 кг зі швидкістю руху кабіни 1 м/с.

Математичною основою скалярного регулювання є рівняння, що описують встановлені режими роботи двигуна, тобто режими, в яких швидкість та момент навантаження двигуна залишаються незмінними.

Природно, що у динамічних режимах за зміни швидкості чи навантаження коректність математичної моделі скалярного управління порушується. Це призводить до досить повільної реакції скалярних систем керування на швидкі дії. Це і є їх основним недоліком: у швидкісному контурі при скалярному регулюванні різка зміна навантаження призводить до закидів або провалів швидкості.

Подальшим кроком у розвитку теорії та практики управління двигуном стало векторне управління. Його математична основа – диференціальні рівняння, що описують електричну машину однаково коректно і в динаміці, і в статичності. Момент при векторному управлінні отримують за допомогою управління амплітудою та миттєвою фазою вектору статора статору або вектору статорної напруги.

З огляду на адекватність управління в динаміці, векторне управління забезпечує найвищу точність і швидкість регулювання.

Система векторного частотного управління асинхронним двигуном базується на поданні фізичних змінних двигуна просторовими векторами, які можуть змінюватися як модулі, так і положення в просторі. Система координат  $dq$  представлена на рис. 1.

Основним обладнанням ліфта є кабіна, підйомна лебідка, канати, противага, упори, двигун, електромеханічний гальмівний пристрій, зовнішнє та внутрішнє керування. Обладнання ліфта розташовується в шахті та в приміщеннях вище та нижче за неї [1].

Сучасні пасажирські та вантажні ліфти в житлових та адміністративних будівлях обладнуються противагою для врівноваження маси кабіни та частини номінального вантажу, що піднімається.

Спрощена кінематична схема пасажирського ліфта наведена на рис. 2.

Т – образна схема заміщення асинхронного двигуна однієї фази наведена на рис. 3 [2].

Перетворювачі частоти змінного струму забезпечують холостий хід на малій швидкості та роботу на повній швидкості з плавним прискоренням та уповільненням. Високий ККД та безпроблемна робота обладнання є гарантією тривалого терміну служби.

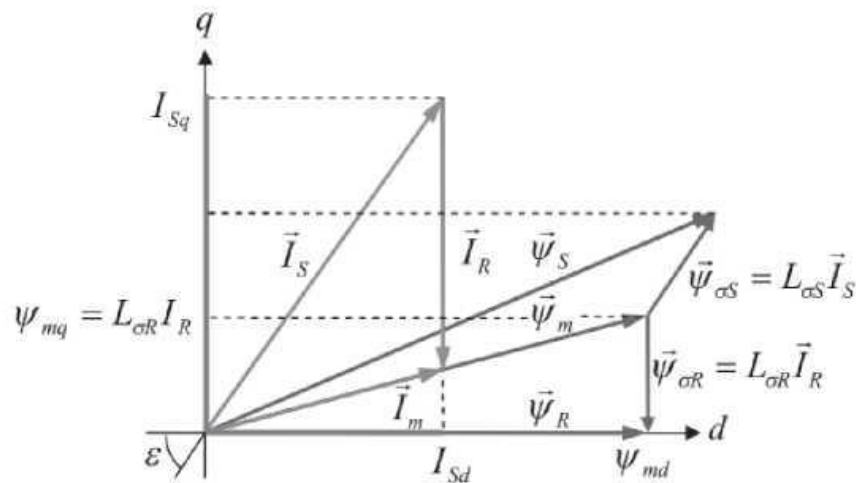


Рисунок 1 – Двофазна система координат

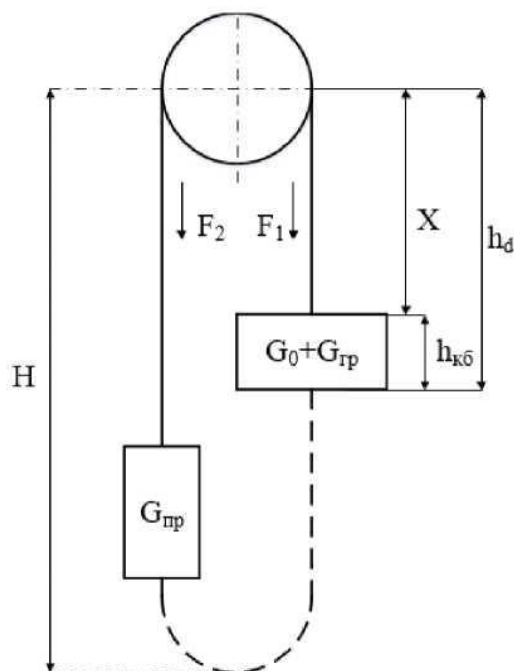


Рисунок 2 – Кінематична схема пасажирського ліфта

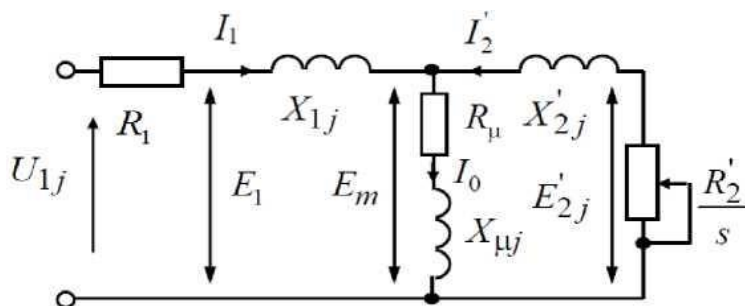


Рисунок 3 – Схема заміщення асинхронного двигуна

Для докладнішого вивчення, як і перехідних процесів двигуна, так і системи керування обраного двигуна буде проводитися поетапно, з докладним порівнянням показників якості кожної моделі. Завдяки цьому можна гарантувати адекватність моделювання. Для побудови математичної моделі та моделювання перехідних процесів використовується програма Matlab Simulink [3].

Імітаційна модель асинхронного двигуна в нерухомій системі координат побудована Matlab Simulink показано на рис. 4.

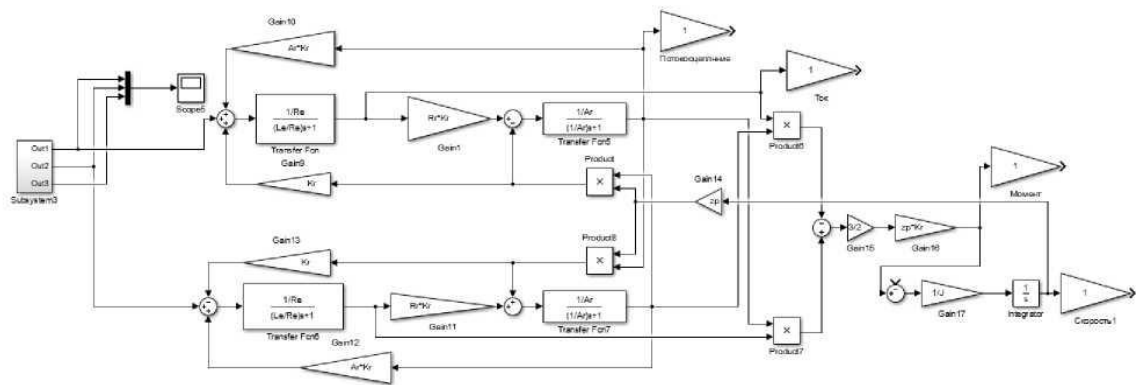


Рисунок 4 – Імітаційна модель асинхронного двигуна в нерухомій системі координат Matlab Simulink

Оскільки система управління будується в системі координат, що обертається, в Matlab Simulink була побудована відповідна імітаційна модель асинхронного двигуна (рис. 5).

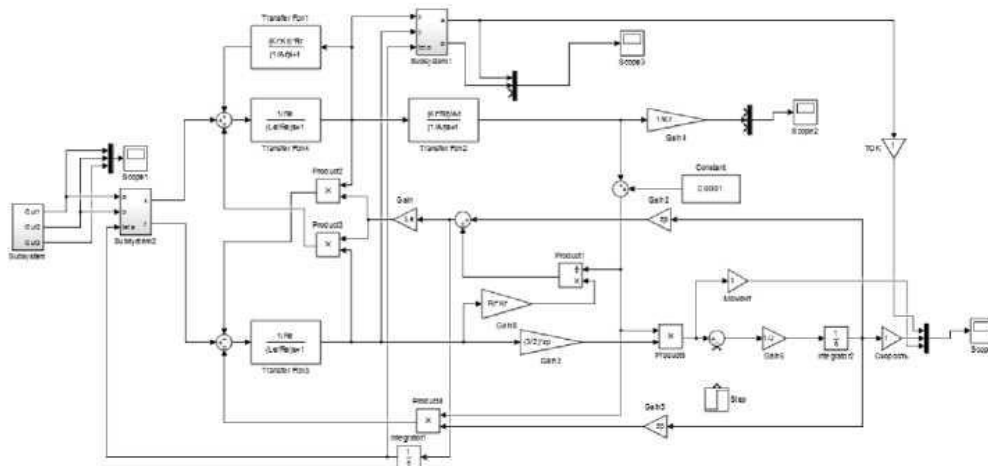


Рисунок 5 – Імітаційна модель асинхронного двигуна в системі координат, що обертається в Matlab Simulink

Ґрунтуючись на отриманих результатах, було прийнято рішення відмовитися від контуру положення з регулятором П-з-а наявності помилки у відпрацюванні сигналу. Імітаційна модель слідкуючого електроприводу з ПІ регулятором контуру положення, з уже вбудованою корекцією інтегрального насичення та обмеженням за швидкістю, наведена на рис. 6. Перехідний процес лінійної швидкості електроприводу показаний на рис. 7.

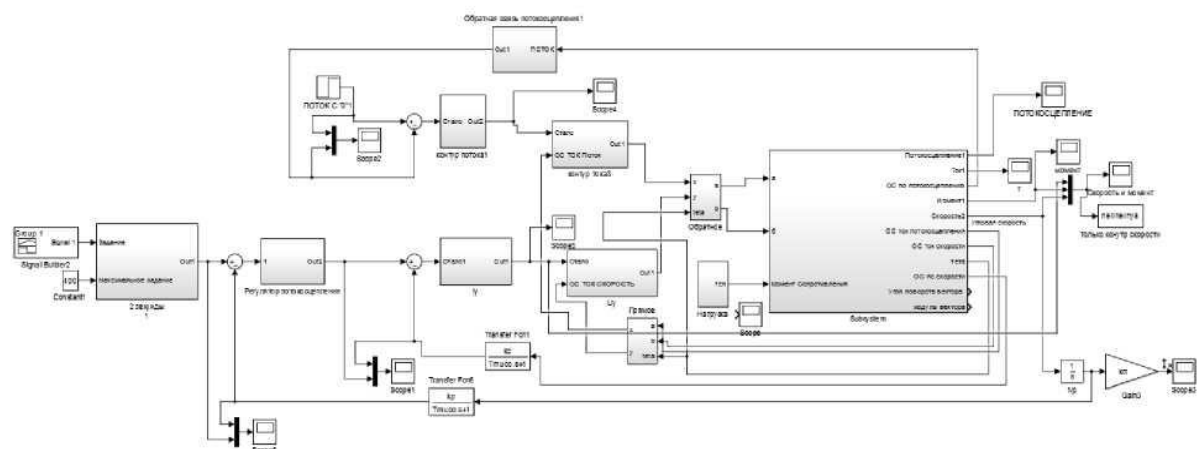


Рисунок 6 – Підсумкова імітаційна модель електроприводу, що стежить

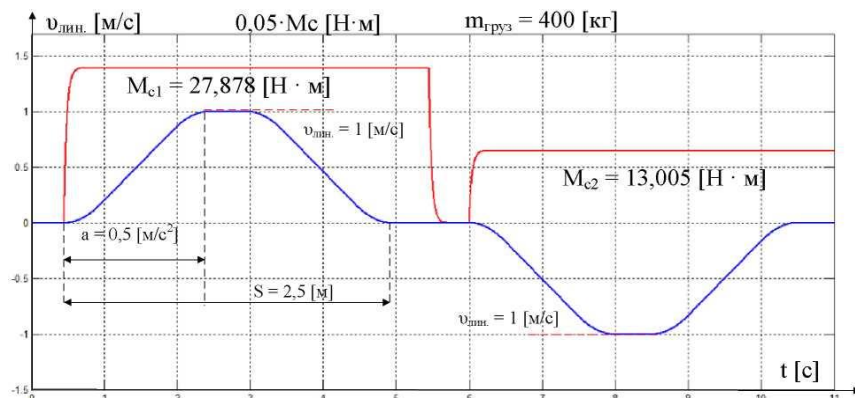


Рисунок 7 – Перехідний процес лінійної швидкості електроприводу

**Висновки.** Розроблено електропривод змінного струму ліфтової лебідки пасажирського ліфта. Обрано асинхронний двигун для спільної роботи з перетворювачем частоти з реалізацією принципів частотно-струмового векторного управління. Виконано ретельний аналіз математичної моделі асинхронного двигуна не тільки у обертовій, але й у нерухомій системі координат. Далі була проведена оптимізація кожного контуру регулювання та ретельний аналіз показань якості кожного з них. Було зроблено порівняння перехідних процесів контуру потокозчеплення та швидкості при використанні аперіодичного ланки 1-го порядку та при використанні повноцінного оптимізованого контуру струму. Після того, як була проведена перевірка системи керування в кожній системі координат, була отримана імітаційна модель лінеаризованої системи автоматичного керування електроприводу нерухомої системи координат. Наступним кроком стало запровадження обмежень в імітаційну модель електроприводу, що дозволяє отримувати перехідні процеси максимально близькі до реальних. Для вирішення проблем, пов'язаних з позиціонуванням кабіни в ліфтовій шахті та точності зупинки, був розроблений налаштований контур положення для отримання електроприводу, що стежить. Потім, для поліпшення якості переміщення та зручності пасажирів у ліфтовій кабіні було додано задатчик інтенсивності з S-подібною характеристикою. В результаті було отримано реалістичну імітаційну модель нелінійної системи автоматичного управління регульованого електроприводу ліфтової лебідки, що відповідає вимогам, пред'явленим у технічному завданні.

#### Список використаних джерел

1. Горемыкин Е.В. Электрооборудование промышленности: в 3-х частях. Ч. Промышленный электропривод : учебное пособие. – Таганрог : Изд-во ТРТУ, 2005. – 288 с.
2. Удут Л.С., Мальцева О.П., Кояин Н.В. Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов : учебное пособие. Ч. 8. Асинхронный частотно-регулируемый электропривод / ТПУ, 2-е изд., перераб. и. доп. – Томск : Изд-во ТПУ, 2014. – 648 с.
3. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы 2.2.2/2.4.1340-03 «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы».
4. Греков Э.Л., Кувшинов А.А., Гусаров А.А. Автоматизированный электропривод пассажирского лифта : методические указания к курсовой работе. – Оренбург : ОГУ, 2012. – 82 с.
5. Калачев Ю.Н. Векторное регулирование / заметки, практика – 72 с.
6. Бурулько Л.К., Дементьев Ю.Н. Электрооборудование промышленности. Электроприводы промышленных механизмов и устройств : учебное пособие. – Томск : Изд-во ТПУ, 2012. – 180 стр.
7. Ланграф С.В. Векторное управление в электроприводі змінного струму / лекційний матеріал [Електронний ресурс]. Режим доступа: <http://ls-general.ru/model/1597-danfoss-ld-302p5k5>.
8. Weeren A. Розробка Роботики Applications with MATLAB i Robotics System Toolbox. – MathWorks Benelux, 2015.
9. Гельман М.В. Преобразовательная техника: учебное пособие / М.В. Гельман, М.М. Дудкин, К.А. Преображенский. – Челябинск : Издательский центр ЮУрГУ, 2009. – 425 с.

УДК 621.314.6

Боросан М. С., Овсянников В. М., к.т.н.

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв

## АНАЛІЗ СХЕМОТЕХНИКИ ПРИСТРОЇВ АВТОМАТИЧНОЇ СИНХРОНІЗАЦІЇ ГЕНЕРАТОРІВ

**Вступ.** Синхронізація суднових синхронних генераторів (СГ) – процес їх ввімкнення на паралельну роботу між собою або між собою та мережею.

Для реалізації процесу синхронізації необхідне виконання наступних умов [1, 2, 3, 6]: рівність частот генераторів (генераторів і мережі)  $\omega_G = \omega_M$ ; рівність напруги генераторів (генераторів і мережі)  $U_G = U_M$ ; рівність за фазою напруги генераторів (генераторів і мережі) в моменті ввімкнення вимикача на паралельну роботу СГ.

Синхронізацію можна здійснювати в ручному, напівавтоматичному та автоматичному режимах.

В ручному режимі весь процес контролюється персоналом, який здійснює регулювання частоти обертання приводного двигуна, напруги генератора і вмикає вимикач СГ за умови виконання вищезазначених умов.

В напівавтоматичному режимі робота пристроїв автоматики може частково корегуватися персоналом.

Автоматична синхронізація не передбачає втручання людини (персоналу) і виконується системою автоматичного керування. Крім того, ця система контролює режими первинного двигуна, СГ, вимикачів та розподіляє навантаження при паралельній роботі генераторів із забезпеченням їх захисту

Невірна синхронізація СГ може вивести з ладу обладнання генераторного агрегату за наступних умов:

а) при замиканні вимикача СГ виникає надмірний струм ввімкнення, обумовлений розбіжністю напруги  $\Delta U$  між напругою генераторів (генераторів і мережі);

б) при надмірній різниці частот СГ і мережі, генератор після ввімкнення «випадає» з синхронізму.

Кількість споживачів електричної енергії, які живляться в певний момент часу від суднової мережі і ступінь їх завантаження залежать від режимів експлуатації судна (стоянка,хід, маневрування і т.і.), навігаційних обставин, району плавання тощо.

Отже, рівень і характер навантаження СГ у складі суднових електростанцій можуть змінюватися в широких межах. Робота в паралельному режимі дозволяє резервувати потужність СГ, виводити окремі СГ з експлуатації для огляду, обслуговування, ремонту без порушення роботи споживачів суднової електроенергетичної системи (СЕЕС).

**Основна частина.** При точній синхронізації підключення СГ відбувається при струмі, близькому до нульового значення. Струм ввімкнення при грубій синхронізації СГ зазвичай близький до номінального значення. При самосинхронізації СГ струм ввімкнення перевищує номінальний у декілька разів [3, 4]. На рис. 1 представлені схема і векторна діаграма напруги для точної синхронізації СГ [1], на рис. 2 та рис. 3 – схеми грубої синхронізації та самосинхронізації

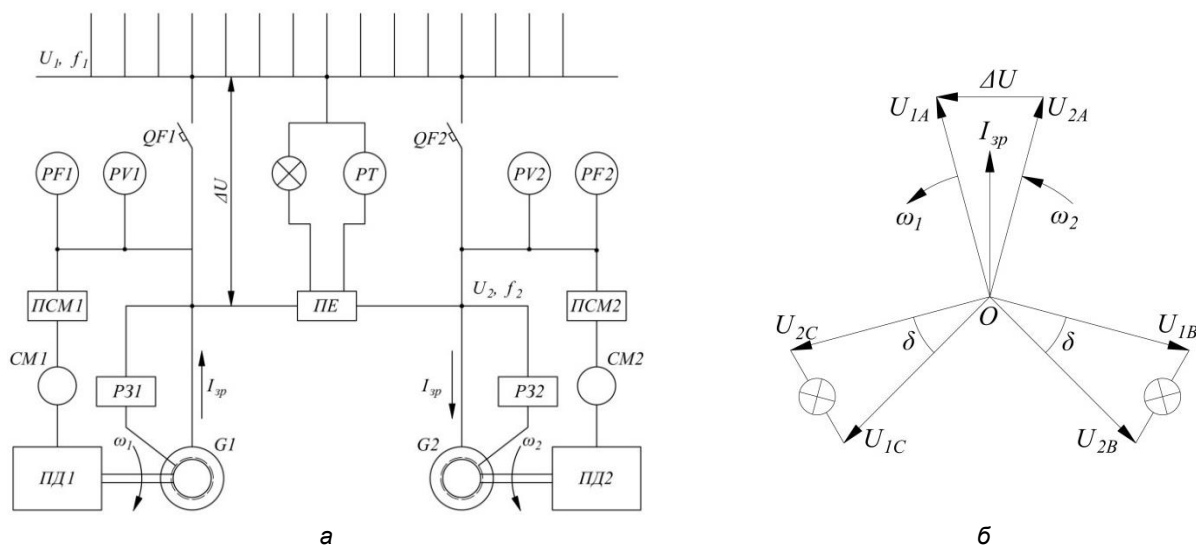


Рисунок 1 – Точна синхронізація СГ: а – схема синхронізації,  
б – векторна діаграма напруг при точній синхронізації

Особливості ввімкнення генератора G2 на паралельну роботу з генератором G1 за цією схемою детальніше описано в [1, 6].

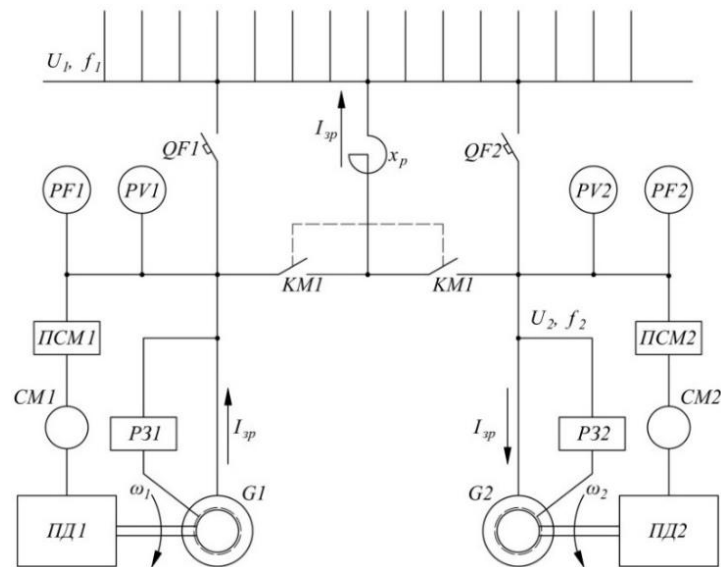


Рисунок 2 – Схема грубої синхронізації СГ

Такий спосіб грубої синхронізації (див. рис. 2) не забезпечує ідеальні умови ввімкнення генераторів на паралельну роботу. При ввімкненні генераторів передбачається певний стрибок струму, величина якого обмежується індуктивним опором (реактором)  $x_p$ .

При грубій синхронізації [1, 2], на відміну від точної, ввімкнення СГ на паралельну роботу відбувається за наявності кута зсуву фаз  $\delta$  між напругами  $\Delta U_1$  і  $U_2$ , що зв'язано зі стрибком зрівнювального струму  $I_{зп}$  між генераторами під дією геометричної різниці цих напруги  $\Delta U$

$$I_{зп} = \frac{\Delta U}{x_1 + x_2 + x_p}.$$

На рис. 3 представлена схема самосинхронізації СГ. Спосіб самосинхронізації генераторів можна використовувати лише в СЕЕС, де відхилення напруги мережі тривалістю в декілька секунд не впливають критично на роботу споживачів електроенергії.

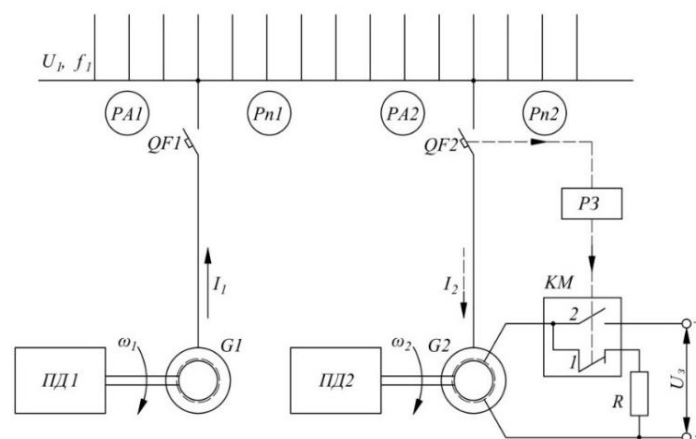


Рисунок 3 – Схема самосинхронізації СГ

Ввімкнення навантажених генераторів на паралельну роботу можна здійснювати тільки способами точної або грубої синхронізації. Перед ввімкненням СГ на паралельну роботу, особливо після їх ремонту або заміни, необхідна обов'язкова перевірка вірності чергування фаз. Ввімкнення генератора G2 на паралельну роботу з генератором G1 детальніше описано в [4, 6].

### Призначення і класифікація систем автоматичної синхронізації

Задачею системи автоматичної синхронізації СГ є створення керуючих впливів на приводні двигуни, системи збудження і комутаційну апаратуру генераторів для їх підключення на паралельну роботу.

Оптимальним для ввімкнення генератора на паралельну роботу є момент проходження кута  $\delta$  через нуль. Це означає, що синхронізатор має генерувати імпульс на ввімкнення вимикача СГ з деяким випередженням часу  $t_{\text{вип}}$  [6]. Точна синхронізація виконується при:  $\delta = 0$ ;  $f_r = f_M$  і  $U_r = U_M$ , але на практиці абсолютно точне вирівнювання частот СГ непотрібне. Синхронізація допускається при різності частот  $f_S = 0,2 - 0,3$  Гц або при ковзанні  $\omega_S = 1,2 - 1,9$  рад/с [15]. Якщо синхронізація проходить з розрахунковим ковзанням  $\omega_{S\text{доп}} = \text{const}$ , то  $\delta_{\text{вип}} \equiv t_{\text{вип}}$ , де  $t_{\text{вип}}$  – час випередження;  $\delta_{\text{вип}}$  – кут випередження.

Отже, для того, щоб контакти вимикача замикались в момент, коли кут  $\delta = 0$ , автоматичний синхронізатор може створювати випередження або за часом  $t_{\text{вип}}$ , або за кутом  $\delta_{\text{вип}}$ . Синхронізатори з постійним часом випередження  $t_{\text{вип}}$  вигідно відрізняються від синхронізаторів з постійним кутом випередження, через що й отримали найбільше поширення.

### Цифровий автоматичний синхронізатор SYNCHROTECT

Схема і параметри мікропроцесорного пристрою автоматичної синхронізації фірми ABB «SYNCHROTECT» наведені на рис. 4 [6].

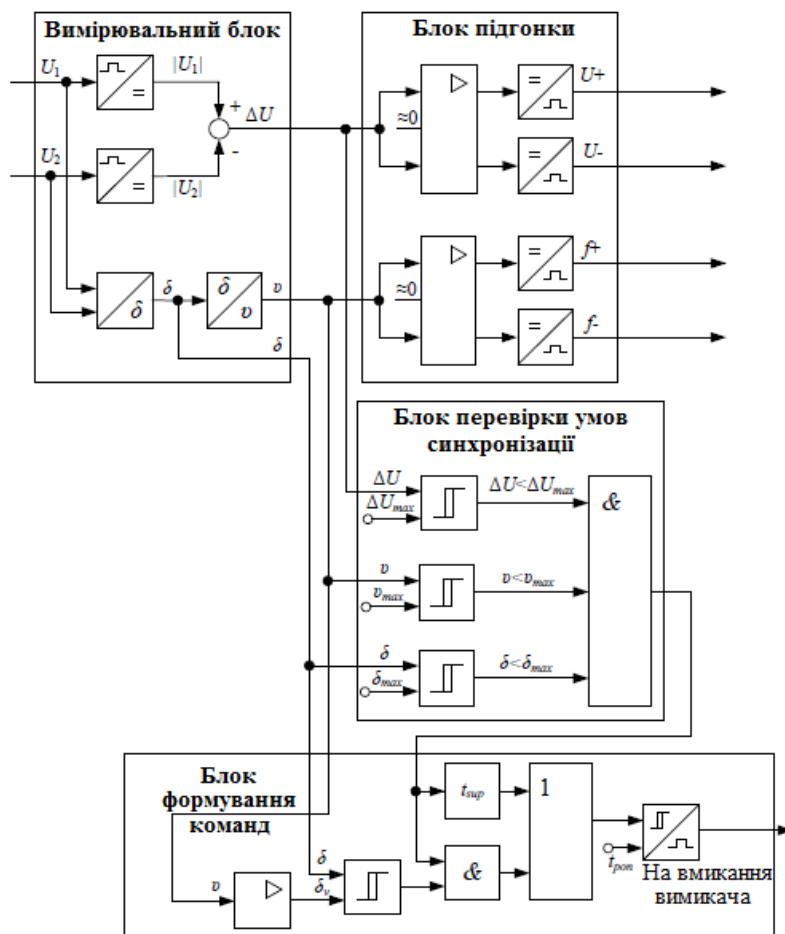


Рисунок 4 – Функціональна схема «SYNCHROTECT»

Таблиця 1 – Параметри синхронізації «SYNCHROTECT»

| Параметр                               | Крок   | Припустимі значення |
|----------------------------------------|--------|---------------------|
| Відносна швидкість                     | 0,01 % | 0–6 %               |
| Відносний кут                          | 1°     | 0–40°               |
| Різниця напруг за абсолютним значенням | 1 %    | 0–40 %              |
| Повний час синхронізації               | 30 с   | 0,5–15 хв           |

З табл. 1 зрозуміло, що «SYNCHROTECT» передбачає можливість регулювання параметрів синхронізації в припустимих межах.

При незадовільних параметрах синхронізації (розбіжність із заданими уставками) здійснюється видача імпульсних керуючих впливів на автоматичні регулятори збудження (АРЗ) і частоти (АРЧО) СГ. Тривалості імпульсів керування змінні і пропорційні величинам різниці напруги і відносної швидкості обертання СГ. Коефіцієнт пропорційності може бути заданий в межах 0,01 %/с – 5 %/с. Можливий також варіант встановлення фіксованої тривалості імпульсу від 0,05 с – 2 с. Інтервал між імпульсами і мінімальна тривалість імпульсу можуть бути встановлені в межах 1 с – 20 с, 0,05 с – 2 с відповідно [6].

Коли відносний кут розбіжності фаз досягає значення  $\delta$ , що відповідає часу, необхідному для замикання контактів вимикача, здійснюється видача команди на ввімкнення вимикача СГ.

Команда на ввімкнення може бути сформована в тому випадку, коли умови синхронізації СГ виконуються протягом заданого проміжку часу. Позначене дозволяє уникнути затримок і затягування процедури синхронізації у випадку достатньо малих величин відносного прискорення.

#### **Узагальнена структурна схема ЕСАС ССГ [6]**

Як прототип для удосконалення і подальшого дослідження ЕСАС ССГ обрано систему синхронізатора «SYNCHROTACT». Спрощена структура розроблюваної ЕСАС ССГ наведена на рис. 5.

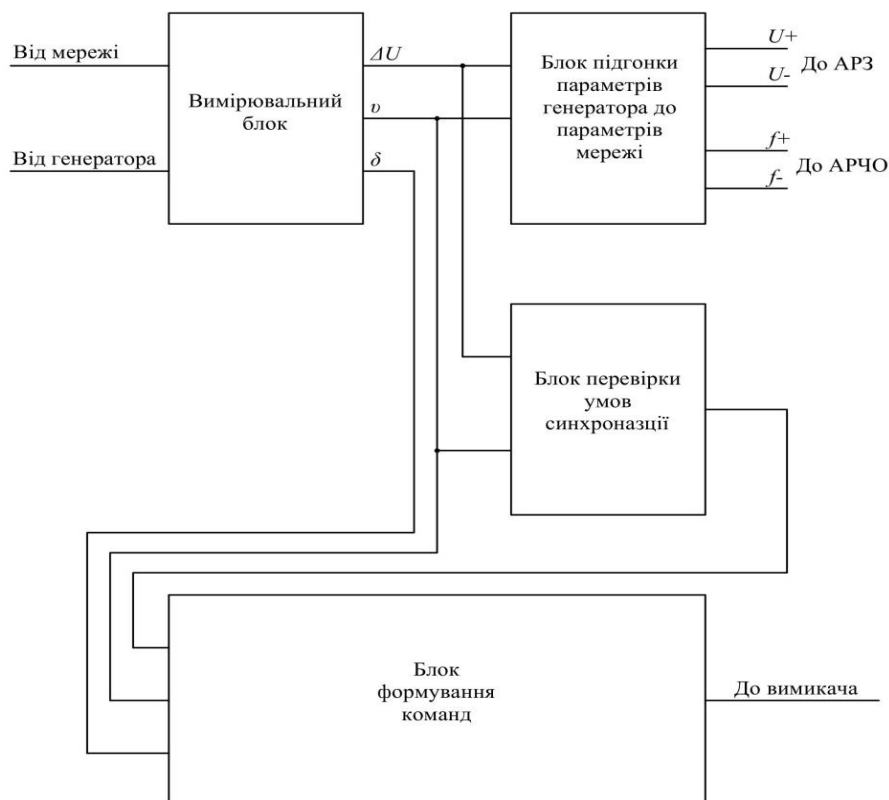


Рисунок 5 – Структурна схема ЕСАС ССГ

Система шляхом впливу на АРЗ і АРЧО СГ здійснює підгонку параметрів генератора до необхідних із заданою похибкою. При виконанні умов синхронізації ЕСАС ССГ видає сигнал на ввімкнення автоматичного вимикача СГ.

#### **Блок вимірювання**



Рисунок 6 – Структурна схема вимірювального блоку

Вимірювальний блок призначено для вимірювання контрольованих параметрів мережі і СГ. Інформація про стан параметрів надходить до інших блоків ЕСАС ССГ (рис. 6).

#### **Блок підгонки параметрів СГ до параметрів мережі**



Рисунок 7 – Структурна схема блоку підгонки параметрів СГ

Блок підгонки параметрів СГ до параметрів мережі призначено для формування сигналів керування АРЗ та АРЧО. Така процедура необхідна для зменшення різниці напруги і частот СГ (СГ і мережі) в припустимих межах (рис. 7).

#### **Блок перевірки умов синхронізації**



Рисунок 8 – Структурна схема блоку перевірки умов синхронізації

Блок перевірки умов синхронізації порівнює значення різниці напруги та частот з максимально припустимими (за умовами синхронізації) значеннями і формує сигнал дозволу, що надходить до блоку формування команд (рис. 8).

#### **Блок формовання команд**

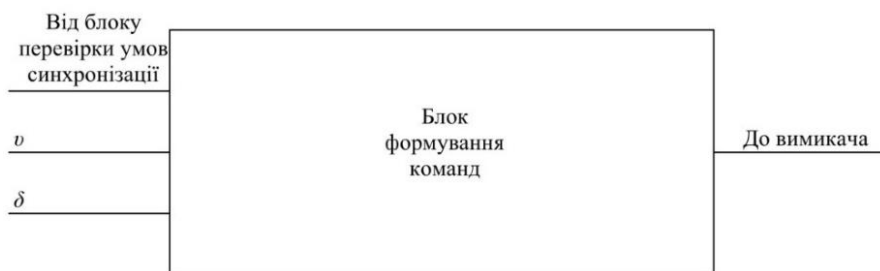


Рисунок 9 – Структурна схема блоку формування команд

При надходженні сигналу дозволу блок формування команд розраховує значення кута випередження і подає сигнал на ввімкнення вимикача СГ при досягненні куту зсуву фаз СГ (СГ і мережі) значення кута випередження (рис. 9).

#### **Формування вимог до складових узагальненої структури ЕСАС ССГ**

Вимоги до складових узагальненої структури ЕСАС ССГ визначаються припустимими значеннями відхилень параметрів СГ від параметрів мережі [3, 4]. Складові системи синхронізації мають забезпечувати ввімкнення СГ при відхиленнях параметрів генератора менших за параметри мережі ( $\Delta U = \pm 5\%$ ;  $v = \pm 0,05 - 0,1$  Гц;  $\delta = 10^\circ$ ).

#### **Програмно-алгоритмічне забезпечення розробки ЕСАС ССГ**

Апаратне керування роботою ЕСАС ССГ засновано на використанні мікроконтролера АТмега640 фірми Atmel [5, 6]. Його архітектура включає достатню кількість необхідних модулів для виконання всіх операцій, що

супроводжують процес синхронізації. Операції передбачають: вимірювання напруги мережі і СГ; вимірювання частот мережі і СГ; вимірювання різниці фаз мережі та СГ; вплив на орган керування автоматичним регулятором збудження СГ; здійснення впливу на орган керування автоматичним регулятором частоти обертання СГ; генерування сигналу на ввімкнення вимикача СГ.

**Висновки.** У роботі розглянуто різні аспекти проєктування та аналізу системи автоматичної синхронізації синхронних генераторів (ЕСАС ССГ).

Зокрема, розглянуто структурну схему ЕСАС ССГ, яка включає такі основні складові: вимірювальний блок, блок підгонки параметрів генератора до параметрів мережі, блок перевірки умов синхронізації та блок формування команд. Визначено основні вимоги до кожної зі складових цієї системи.

Розглянуто програмно-алгоритмічне забезпечення моделі, зокрема: узагальнений алгоритм роботи та програмний код для керування системою, алгоритми роботи кожного блоку, включаючи вимірювальний блок (двоканальний вольтметр, частотомір, фазомір), блок підгонки параметрів генератора, блок перевірки умов синхронізації та блок формування команд.

#### Список використаних джерел

1. Суднові автоматизовані електроенергетичні системи. Ч. 1 / Голіков С.П., Чорний С.Г., Жук Д.О. та ін. – Київ: Кондор, 2013. – 198 с.
2. Белікова Л.Я. Електричні машини : навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. / Л.Я. Белікова, В.П. Шевченко. – Одеса : Наука і техніка, 2012. – 478 с.
3. Андрієнко В.Н. Електричні машини : навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл., які навч. за. напрямом підготовки «Електротехніка та електротехнології» / В.М. Андрієнко, В.П. Куєвда. – Київ : НУХТ, 2010. – 366 с.
4. Електричні машини : підручник / Б.Т. Кононов, Г.І. Лагутін, О.Б. Котов та ін. ; за заг. ред. Б.Т. Кононова. – Харків: ХУПС, 2015. – 496 с.
5. Сабадаш І.О. Новітні мікропроцесорні технології в експлуатації мереж 6–35 кВ // Электрические сети и системы. – 2011. – № 6.
6. Устройство точной автоматической синхронизации СПРИНТ-М: инструкция по эксплуатации. – М. : ЗАО «Радиус Автоматика», 2003. – 43 с.
7. Хохулін Б.К. Пристрої захисного вимкнення в мережах низької напруги. – Львів: ЛьвЦНТІ, 2000. – 91 с.
8. Прокопенко В.С. Програмування мікроконтролерів ATMEGA мовою C / В.С. Прокопенко. – Київ : МК-Прес, 2012. – 320 с.

УДК 621.315.611

Пальчиков О. О., к.т.н.

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв

## АНАЛІЗ МАТЕРІАЛІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ ІЗОЛЯТОРІВ

Сучасні ізолятори виготовляють із порцеляни, загартованого скла та полімерних композитних матеріалів (рис. 1). Полімерні ізолятори, такі, як із силіконової гуми або посиленої скловолокном смоли, стають все більш популярними через їхню легкість, міцність та стійкість до зовнішніх впливів, хоча традиційні фарфор і скло також залишаються затребуваними.



Рисунок 1 – Композитний ізолятор фірми Reinhausen Power Composites

Традиційні матеріали – це електротехнічна порцеляна, що виготовляється з каоліну, кварцу і польового шпату, відрізняється високою механічною міцністю, довговічністю і стійкістю до агресивних середовищ; загартоване скло, що використовується для ізоляторів, має високу міцність та хороші діелектричні властивості.

**Метою роботи** є огляд сучасних матеріалів для виготовлення ізоляторів, які представлені полімерними композитами.

Полімерні композити – це найсучасніша категорія, що включає різні матеріали: силіконову гуму, яка має хороші діелектричні властивості та стійкість до УФ-випромінювання, але має нижчу механічну міцність; епоксидні смоли, які використовуються для ізоляції всередині приміщень, так як мають відмінні електричні властивості, але можуть руйнуватися під впливом ультрафіолету; поліестер, армований скловолокном – це матеріал, що має високу механічну міцність і відмінні електроізоляційні властивості; термопласти (наприклад, DMC); які використовуються в низьковольтних програмах.

Полімерні ізолятори виграють за вагою та простотою монтажу, що робить їх ідеальними для ліній електропередач високої напруги. Фарфорові та скляні ізолятори, як і раніше, широко використовуються завдяки своїй надійності, але вони більш важкі, ніж полімерні.

Енергетичні системи повинні стати більш керованими, щоб оптимізувати потік енергії та зменшити втрати. Тому класична енергетична система повинна постійно адаптуватися, щоб забезпечити краще використання розподіленої генерації, накопичення енергії та інформаційної інфраструктури, тобто постійний струм високої напруги (HVDC), передові системи накопичення енергії, надфективна сонячна енергетика, передова технологія морських вітрових турбін, мікромережі, гібридна відновлювана енергетика та управління енергією в Інтернеті речей. Усі ці технології висувають суворіші вимоги до систем ізоляції, особливо до тих, що працюють на відкритому повітрі, оскільки напруження лише посилюватимуться. Професор Станіслав Губанський з Технологічного університету Чалмерса у Швеції розглянув напрямки дослідницьких зусиль та навів приклади, виконаних у співпраці з Королівським технологічним інститутом у Стокгольмі [1–4].

Один із перших розробників композитних ізоляторів із силіконового каучука, професор Герман Кернер з Німеччини, вказав на найважливіший взаємозв'язок між властивостями матеріалу та геометричним ізолятором, сформулювавши так звану «матрицю Кернера». У ній він сказав, що виробництво високоякісних композитних ізоляторів неможливо без урахування двох факторів: хорошого матеріалу і хорошої конструкції. Ця матриця була пізніше розроблена доктором Константином Папайліу та доктором Франком Шмуком (рис. 2) [5]. Принцип Кернера залишається актуальним і повинен застосовуватися при пошуку підходящих оптимізованих матеріалів і геометрії ізоляторів, найбільш стійких до старіння та іншим пошкодженням.

Бажаний напрямок поточних досліджень включає розробку матеріалів для застосувань HVDC (HVDC – це технологія передачі електроенергії на великі відстані з використанням високої напруги постійного струму), а також впровадження термопластичних полімерів, що покращують переробку продукції.

| Матеріали,<br>стійкі до<br>зовнішніх<br>впливів                        | Поганий ізолятор<br>(геометрія ізолятора сприяє<br>старінню/пошкодженням)                                                                              | Хороший ізолятор<br>(геометрія ізолятора не сприяє<br>старінню/пошкодженням)          |
|------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Поганий<br>матеріал<br>(недостатній)                                   | Нормальний<br>(дуже висока ймовірність<br>невдачі)                                                                                                     | Неможливий<br>(неможливо досягти надійної<br>довгострокової роботи)                   |
| Хороший<br>матеріал<br>(придатний для<br>використання,<br>оптимальний) | Дуже легко, коли погано<br>спроєктовано<br>(знижена ймовірність відмови,<br>рекомендована діагностика,<br>критично важлива довгострокова<br>поведінка) | Потребує ноу-хау<br>(надійна поведінка, підтверджено<br>більш ніж 40-річним досвідом) |

Рисунок 2 – Матриця Кернера (вихідні вирази чорним кольором, а введені доповнення – текст у скобках)

Основною характеристикою матеріалу для градації польових напружень є те, що його електропровідність збільшується вище порогового значення електричного поля. Ця властивість потім використовується для зменшення максимального польового напруження в критичних місцях всередині системи ізоляції. Композит МГН складається з базового полімеру (наприклад, силіконової гуми SIR, мономеру етиленпропілен-дієнової гуми

EPDM, епоксидної смоли або термопластику), наповненого карбідом кремнію SiC, оксидом цинку ZnO або сажею. Однак останні дослідження зосередилися на можливостях, що надаються нанонаповнювачами, особливо оксидом графену (GO) та нанопластинками графену (GnP). Процес виготовлення досліджуваних зразків здійснюється методом екструзії розплаву, що є привабливим промисловим процесом, проілюстрованим на рис. 3.



Рисунок 3 – Схематичне зображення процесу підготовки зразків

Ще однією важливою властивістю для застосування в композитних ізоляторах для апаратів є проникність для різних газів. Швидкість проникнення CO<sub>2</sub> та SF<sub>6</sub> вимірюється для виготовлених нанокompозитів шляхом моніторингу концентрації газу в замкнутому об'ємі повітря під атмосферним тиском. Швидкість проникнення для SF<sub>6</sub> зменшилася на 74,7 % для зразка, заповненого 1% мас, і зменшилася на 80,5 % для зразка, заповненого 7,5% мас. Ця поведінка пов'язана з розміром молекул газу.

Вплив біоплівки на стійкість композитних ізоляторів відомий вже багато років. Польові спостереження показали, що такі нарости пов'язані не лише з тропічними або субтропічними умовами, оскільки вони також з'являються в помірному кліматі. Існує кілька способів, якими біоплівка може впливати на структуру та функцію полімерних матеріалів. До них належать: біообростання (забруднення), деградація компонентів, що вимиваються, ерозія, гідратація, проникнення та зміна кольору. У випадку ізоляторів з силіконової гуми гідрофобні властивості їхньої поверхні можуть значно зменшитися, що призводить до вищого струму витoku, нижчої стійкості до перекриття та прискореної деградації.

Пошук засобів для перешкоджання росту біоплівки триває, і були знайдені спеціальні добавки, які роблять матеріали корпусу більш стійкими до біорозкладу. Наприклад, було продемонстровано, що додавання вогнезахисного агента, борату цинку, до силіконової гуми значно пригнічує ріст біоплівки. Також додавання біоцидів, тобто активних інгредієнтів, які знищують або пригнічують розмноження мікроорганізмів, розглядається як ще один спосіб покращення характеристик матеріалів на основі силіконової гуми в середовищах, що характеризуються підвищеним ризиком утворення біоплівки. Однак включення антимікробних агентів не повинно негативно впливати на електричні властивості матеріалу корпусу. Дослідження тривають і наразі зосереджені на більш екологічно чистих рішеннях. Наприклад, нещодавні дослідження Королівського технологічного інституту в Стокгольмі показали, що біоцидного ефекту в силіконовій гумі також можна досягти шляхом додавання сполук природного походження, включаючи бензойну кислоту, тимол, евгенол або хітозан. Тимол виявився дуже ефективним проти росту грибків та водоростей, і ознаки цього інгібуючого ефекту.

Ще однією бажаною властивістю матеріалу, особливо для застосувань постійного струму високої напруги (HVDC), є дуже низька електропровідність. На відміну від чистих полімерних систем, які мають низьку провідність, було застосовано підхід, заснований на додаванні нанонаповнювачів. Були досліджені нанокompозити на основі LDPE, що містять неорганічні частинки Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO та ZnO, а також наночастинки графену. Рівні вимірюваного струму для всіх нанокompозитів були значно нижчими порівняно з еталонним матеріалом, що вказує на ослаблення переносу заряду.

Стаття [6] зосереджена на електрохімічних та оптичних властивостях спряжених полімерів n-типу, що містять акцепторні одиниці нафталіндіїміду (NDI) в їх нейтральному та відновленому станах. Результати

досліджень вказують на те, що *n*-легкування спряжених полімерів на основі нафтилдїїміду суттєво відрізняється від легування типових спряжених полімерів *p*-типу, що тягне за собою утворення делокалізованих носіїв заряду, таких як полярони та біполарони. Практично перевірено *n*-типову (електрон-акцепторну) продуктивність полімерів на основі NDI шляхом їх використання разом з полі(3-гексилтіюфеном) -донором електронів в об'ємних гетероперехідних фотоелектричних пристроях.

У дослідженні [7] представлено розробку аналітичної моделі (АМ), призначеної для прогнозування модуля пружності на розтяг для набору даних із 64 поліпропіленових компаундів з різними наповнювачами та добавками, включаючи крейду, модифікатори ударної в'язкості та пероксидні добавки. АМ, що включає як логарифмічні, так і лінійні компоненти, була порівняна зі штучною нейронною мережею (ШНМ) для оцінки її ефективності. Результати показують, що АМ постійно перевершує ШНМ, досягаючи нижчої середньої абсолютної похибки (MAE) та вищих значень коефіцієнта детермінації ( $R^2$ ). Максимальне значення  $R^2$ , що дорівнює 0,98, може бути досягнуто при прогнозуванні модуля пружності на розтяг. Простота та надійність АМ з її 14 параметрами підгонки порівняно з приблизно 1300 параметрами ШНМ роблять її корисним інструментом для промисловості пластмас, забезпечуючи практичний підхід до оптимізації рецептур компаундів з мінімальним емпіричним тестуванням.

Час, необхідний для розробки надійних полімерних ізоляторів та досягнення широкого визнання на ринку, становить більше 30 років, виходячи з досвіду використання сучасної технології композитних ізоляторів. Більшість попередніх досліджень були присвячені пошуку надійних матеріалів для лінійних ізоляторів, а також переконанню користувачів у тому, що вони надійно працюють у зовнішніх умовах. Паралельно інші роботи були спрямовані на розробку відповідних виробничих технологій, розробку критеріїв проектування ізоляторів та підготовку процедур випробувань для нових концепцій. Пізніше з'явилися полімерні ізолятори для стовпів станцій та апаратів, а також еластомерні покриття. Разом все це призвело до того, що композитні ізоляційні системи зараз широко застосовуються в енергетиці.

**Висновки.** Проведено аналіз сучасних полімерних матеріалів для виготовлення ізоляторів. Метою майбутніх досліджень є розробка математичних моделей електротехнічних виробів, вироблених з цих полімерних матеріалів, а також розробка методів керування градацією польових властивостей, підвищенням стійкості до біообростання, збільшенням пробивної міцності та зменшенням провідності постійного струму вказаних матеріалів.

#### Список використаних джерел

1. Desta B.Z., Wogari M.M., Gubanski S.M. Investigation on Pollution-Induced Flashovers of In-Service Insulators in Ethiopian Power Transmission Lines. – *Energies*, 2024, Vol. 17(9). <https://doi.org/10.3390/en17092007>
2. Yuan C., Xie C., Li L., Xu X., Gubanski S.M. Space charge behavior in silicone rubber from in-service aged HVDC composite insulators. – *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 26(3), 2019. – P. 843–850. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2018.007870>
3. Alam S., Serdyuk Y., Gubanski S.M. Temperature and Field Induced Variations of Electric Conductivities of HTV Silicone Rubbers Derived from Measured Currents and Surface Potential Decay Characteristic. – *Energies*, 2020, Vol. 13(11). <https://doi.org/10.3390/en13112982>
4. Gaska K., Kádár R., Xu X., Gubanski S.M. Highly structured graphene polyethylene nanocomposites. – *Conference Proceedings*, 2019, Vol. 2065(1):030061. <https://doi.org/10.1063/1.5088319>.
5. Papailiou K., Schmuck F. Silicone Composite Insulators: Materials, Design, Applications. – *Power Systems*, 2013, Vol. 75. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-15320-4>
6. Ledwon P., Jarosz T., Daria Ovsianikova D., Gogoc S. Insight into the properties and redox states of *n*-dopable conjugated polymers based on naphthalene diimide units. – *Electrochimica*, 2019, Acta 307 <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2019.03.169>
7. Selfen L., Leuchtenberger-Engeland L., Hopmann C. Development of an Analytical Model for Predicting the Tensile Modulus of Complex Polypropylene Compounds. – *Polymers*, 2024, Vol. 16(23), 3403; <https://doi.org/10.3390/polym16233403>

УДК 621.3.066

*Пальчиков О. О., к.т.н.**Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв*

## АНАЛІЗ ЕВОЛЮЦІЇ ВАКУУМНИХ ВИМИКАЧІВ

Вакуумний вимикач став одним із найважливіших компонентів сучасних систем розподілу електроенергії. Протягом останніх кількох десятиліть ця технологія значно еволюціонувала, від раннього розвитку до сучасних можливостей.

Концепція використання вакууму як ізоляційного середовища для вимикачів сягає середини 20 століття. До цього вимикачі працювали переважно за допомогою повітря, оливи або газу (наприклад, гексафториду сірки, SF<sub>6</sub>) для гасіння дуги, що утворюється при перериванні електричного струму. Однак ці методи мали кілька недоліків, таких як погані діелектричні властивості, вплив на навколишнє середовище та проблеми з обслуговуванням.

Вакуумна технологія, навпаки, запропонувала новий інноваційний підхід. Вакуум – це середовище з малою кількістю повітря або без нього, а відсутність повітря дозволяє ефективно переривати електричну дугу без утворення шкідливих побічних продуктів. Впровадження вакуумних вимикачів, які використовують вакуумну камеру для гасіння електричних дуг, ознаменувало значне покращення надійності та безпеки.

**Метою роботи** є огляд сучасних вакуумних вимикачів, які пройшли еволюцію від низьковольтних застосувань до впровадження в системи середньої та високої напруги.

Вакуумні вимикачі пропонують кілька ключових переваг порівняно з іншими методами, а саме, мають набагато довший термін служби, ніж масляні або повітряні вимикачі, оскільки вакуум запобігає утворенню забруднень, які можуть пошкодити контакти; вакуумний вимикач самоочищається, і оскільки він не використовує масло або газ, існує менший ризик витоку або деградації з часом; вакуумний вимикач компактніший і легший за свої масляні або елегазові аналоги, що робить його ідеальним для установок з обмеженим простором.

Сьогодні вакуумний вимикач широко використовується в різних секторах, включаючи виробництво електроенергії, розподіл, промислові підприємства та навіть деякі житлові приміщення. Оскільки електричні мережі стають складнішими, а попит на чисту та ефективну енергію зростає, вакуумний вимикач еволюціонував, щоб відповідати цим новим викликам.

Сучасний вакуумний вимикач призначений як для середньої, так і для високої напруги. Він використовується для захисту електричних кіл від перевантажень, коротких замикань та інших несправностей на підстанціях, електростанціях та інших критично важливих об'єктах інфраструктури. Діапазон напруги для цього вимикача зазвичай коливається від 1 кВ до 72,5 кВ, а деякі конструкції здатні витримувати навіть до 145 кВ. Актуальні вакуумні вимикачі відомі своїми компактними та надійними конструкціями. Виробники зосередилися на покращенні їхніх механічних властивостей, забезпечуючи їхню роботу в екстремальних умовах з мінімальним обслуговуванням. Це призвело до широкого впровадження в сучасних енергомережах, де надійність та час безвідмовної роботи мають вирішальне значення.

Оскільки електротехнічна промисловість рухається до розумних мереж та більш автоматизованих систем, вакуумні вимикачі були інтегровані з цифровими технологіями. Інтелектуальні вакуумні вимикачі оснащені датчиками та системами керування, які дозволяють здійснювати моніторинг у режимі реального часу та дистанційне керування. Це дозволяє комунальним підприємствам ефективніше діагностувати проблеми, оптимізувати графіки технічного обслуговування та навіть прогнозувати збої до їх виникнення.

У відповідь на зростаючі екологічні проблеми вакуумні вимикачі здобули популярність як екологічно чиста альтернатива елегазовим вимикачам, які сприяють глобальному потеплінню. Хоча елегаз є ефективним ізолюючим газом, він є потужним парниковим газом, і його використання обмежене в деяких регіонах. Вакуумні вимикачі, з іншого боку, не містять шкідливих газів, що робить їх більш сталим рішенням.

Безпека є важливим фактором у сучасних електричних системах. Вакуумний вимикач пропонує чудові можливості гасіння дуги, зменшуючи ризик електричних пожеж, пошкодження обладнання та загрозу безпеці операторів. Він також менш схильний до внутрішнього забруднення та поломок, які можуть вплинути на масляні та газові вимикачі.

Незважаючи на численні переваги, вакуумний вимикач все ще стикається з кількома проблемами. Початкова вартість вакуумного вимикача вища порівняно з іншими типами вимикачів, особливо у високовольтних системах. Однак його тривалий термін служби та знижені витрати на обслуговування можуть зробити його більш економічно ефективним вибором з часом. Хоча вакуумні вимикачі компактні для середньовольтних систем, масштабування до систем надвисокої напруги все ще створює труднощі. Більші вакуумні вимикачі, здатні обробляти напругу понад 110 кВ, є складнішими у проектуванні та виробництві. Інтеграція вакуумного вимикача з існуючими

системами іноді може вимагати додаткового обладнання або модернізації, особливо у застарілих системах, які використовують старіші технології, такі як масляні або повітряні вимикачі.

Високовольтні вакуумні вимикачі Siemens Energy – це комутаційні пристрої для високовольтних електричних систем, які використовують вакуумну технологію для безпечного та надійного переривання струму. Siemens Energy має понад 40 років досвіду роботи з технологією вакуумної комутації, яку вона використовує у своїх розподільних пристроях середньої напруги та поставила понад 5,5 мільйона вакуумних перебивачів, а тепер поширила її на високовольтні системи до 145 кВ (рис. 1) [1]. Вимикачі призначені для систем розподілу електроенергії середньої та високої напруги, включаючи підстанції, а також для специфічних вимог у секторах виробництва електроенергії.



Рисунок 1 – Еволюція вакуумних вимикачів компанії Siemens Energy

Вакуумні вимикачі First MV (середня напруга), які були розроблені в 1976 році, використовуються в електромережах середньої напруги (зазвичай від 1 кВ до 35 кВ), тоді як вакуумні вимикачі First HV (висока напруга), які впровадили в експлуатацію в 2010 році, застосовуються в електромережах високої напруги (зазвичай вище 35 кВ). Конструкція першого високовольтного вакуумного вимикача передбачала використання кількох вакуумних переривників середньої напруги, послідовно з'єднаних на кожну фазу, для досягнення бажаної напруги. Цей підхід адаптував існуючі пружинні механізми та дозволив швидко виготовити прототипи, зменшивши витрати та час розробки, хоча переривники середньої напруги спочатку не були оптимізовані для застосування у високій напрузі. Зі збільшенням рівнів напруги від середнього до високого та надвисокого, зазор між контактами та діаметр необхідно збільшувати для підтримки достатньої напруженості електричного поля. Сучасні розробки включають використання спеціалізованих матеріалів, таких як сплави на основі Cu-Cr (мідь-хром) для контактів, які покращують продуктивність та витримують номінальні напруги.

Вакуумний переривник – це герметична керамічна камера, що містить нерухомі та рухомі контакти, які розділені для переривання струму. Нерухомі та рухомі контакти розташовані всередині вакуумного переривника і призначені для роз'єднання та створення дуги при розриві кола. Захист дуги допомагає стримувати та гасити дугу, яка утворюється між контактами під час розриву. Основний корпус захищає внутрішні компоненти від навколишнього середовища та забезпечує ізоляцію.

Коли потрібно розірвати коло, рухомий контакт відокремлюється від нерухомого контакту. Роз'єднання призводить до утворення вакуумної дуги, яка являє собою плазму, що складається з металевої пари з контактами. Вакуумне середовище має вирішальне значення, оскільки воно запобігає повторному запалюванню дуги після її згасання, забезпечуючи повне переривання струму.

У 2017 році був розроблений вакуумний вимикач First HV vacuum GIS with clean air 72.5 kV. Основні відмінності від попереднього вимикача First HV vacuum CV полягають в тому, що нова розробка вакуумний розподільний пристрій високої напруги з чистим повітрям 72,5 кВ – це специфічний тип елегазового розподільного пристрою, який використовує вакуумні переривники та чисте повітря як ізолююче середовище замість шкідливого газу SF<sub>6</sub>.

Конструкція First HV vacuum GIS with clean air 72.5 kV – це компактна модульна система, яка може бути відкритою або компонентом у складі більшої системи розподільного пристрою, представляє собою металевий, герметично закритий, компактний блок, що містить кілька високовольтних компонентів, значно компактніший та може бути ідеальним для обмежених просторових приміщень завдяки високій діелектричній міцності вакууму.

Екологічність удосконаленого вимикача – нульові викиди парникових газів, оскільки чисте повітря є екологічно безпечним, проте традиційна система може використовувати елегаз, який є потужним парниковим газом.

First HV vacuum GIS with clean air 72.5 kV практично не потребує технічного обслуговування завдяки герметичній конструкції, яка запобігає зовнішньому забрудненню, тоді як попередні розробки потребують більше технічного обслуговування через наявність повітряної ізоляції, яка піддається впливу факторів навколишнього середовища.

Основні відмінності вакуумного вимикача з чистим повітрям First HV vacuum CB with clean air 145 kV модифікації 2017 року, полягають у збільшенні рівня напруги у два рази. Ці вимикачі оптимізовані для конкретного випадку використання. Перший вакуумний вимикач на 145 кВ із системою ізоляції чистим повітрям був впроваджений як пілотний проєкт на підстанції Siemens Energy у Німеччині. Ця технологія поєднує вакуумну технологію для комутації та гасіння дуги з чистим повітрям (80 % азоту, 20 % кисню) як високовольтним ізоляційним середовищем.

Перший у світі розподільчий пристрій з газовою ізоляцією First HV vacuum GIS with clean air 145 kV з технологією чистої повітряної ізоляції та вакуумної комутації був поставлений компанією Siemens компанії BKK Nett у Норвегії. Ця технологія, відома як Blue GIS™, використовує суміш азоту та кисню як ізоляційне середовище замість парникового газу SF6 (гексафториду сірки).

Замовлена підстанція 8VN1 має номінальну напругу 145 кВ, номінальний струм відключення короткого замикання 40 кА та номінальний струм 3150 А (рис. 2). Використані нетрадиційні малопотужні вимірювальні трансформатори забезпечують особливо компактну конструкцію. Розміри та вага розподільного пристрою до 20 відсотків менші, ніж у системі зі звичайними трансформаторами струму та напруги. Технологія також дозволяє гнучко параметризувати вимірювальні та захисні системи відповідно до конкретних вимог замовника.



Рисунок 2 – Підстанція 8VN1 на номінальну напругу 145 кВ і інтер'єр LPIT

Передача даних по оптоволоконному кабелю зменшує кількість проводів, і немає резервного рішення для використання звичайних вимірювальних та захисних систем. Малопотужні приладові трансформатори (LPIT) – це трансформатори струму, напруги і датчиків, що використовуються в електричних мережах для вимірювання та захисту (рис. 3). Ці трансформатори менші та ефективніші за традиційні, і стають стандартом у таких системах, як елегазові розподільчі пристрої (GIS), для більшої безпеки та продуктивності, і є важливим кроком у напрямку цифрової підстанції.

Вакуумні вимикачі Siemens Energy використовують вакуум для гасіння електричної дуги, що робить їх ефективними та довговічними. Вживається модульна платформа для адаптації різноманітних застосувань та потреб клієнтів. Запатентована конструкція та використання вакуумної технології забезпечують надійну роботу та низькі експлуатаційні витрати. Вакуумні вимикачі призначені для роботи у високовольтних системах, до 1100 кВ у деяких моделях.

Компанія ABB розвинула технологію вакуумної та повітряної ізоляції, покращуючи продуктивність, мініатюризуючи компоненти та інтегруючи цифрові можливості, такі як моніторинг у режимі реального часу та прогнозне обслуговування. Ключові досягнення включають розробку вакуумного вимикача VD4 evo із вбудованими датчиками для цифрового управління активами та створення розподільного пристрою UniSec Air без елегазу, що використовує суміші сухого повітря або природного газу, що значно знижує потенціал глобального потепління. Ця еволюція зумовлена потребою в більшій надійності, безпеці, стійкості та інтеграції з технологіями інтелектуальних мереж.



Рисунок 3 – Шляхи до технологій захисту та наведення: через об'єднаний підрозділ і безпосередньо до пристрою захисту/керування полем

ABB вже понад 35 років є еталоном ринку вакуумних вимикачів середньої напруги, які є ключовими компонентами для забезпечення безперервного потоку електроенергії. Постійні вдосконалення призвели до появи менших, герметичних та захищених вакуумних вимикачів, вбудованих у стовпи, для захисту від вологи та пилу, що підвищує надійність та обслуговування.

Поточне покоління автоматичних вимикачів ABB розраховане на мережеву напругу від 12 до 38 кВ, струми короткого замикання до 63 кА та номінальні струми до 4000 А (рис. 4). Наприкінці 2004 року серія вимикачів VG була розширена з 31,5 кА до 40,5 кВ. Крім того, було створено перемикач меншого розміру VGE5 для струмів від 16 кА до 12 кВ.

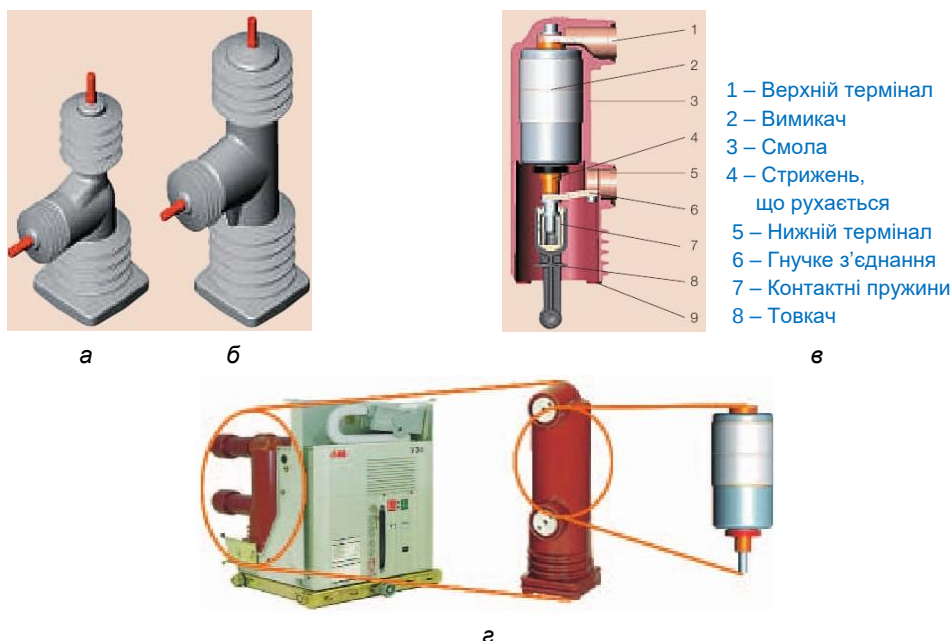


Рисунок 4 – Всепогодні герметизовані переривники на 15–27 кВ/1000 А/12 кА (а) та 38 кВ/1000 А/16 кА (б), внутрішня конструкція вакуумного вимикача (в) і розташування переривника у вимикачі компанії ABB (г)

Умови довкілля сильно впливають на перемикачі. Накопичення пилу, бруду, хімікатів та вологи на зовнішній поверхні знижує навантаження. При використанні на відкритому повітрі дощ та лід мають аналогічний ефект.

Цикли температур, зовнішні удари та вібрація висувають дуже суворі вимоги до механічної стійкості. Грозові розряди та перехідні процеси, що виникають при перемиканні, викликають перенапруги, що призводять до перевантаження ізоляції. Компанія ABB вирішила ці проблеми, уклавши перемикачі в епоксидну смолу. Цим шляхом формується цілісний полюс.

Повна серія інкапсульованих полюсів вакуумних переривників усередині та зовні приміщень забезпечує відповідну платформу для багатьох застосувань у розподільних пристроях усередині та зовні. Ці пристрої гарантують високу стійкість до впливів навколишнього середовища та не потребують обслуговування. Ця серія пристроїв нещодавно була розширена за рахунок опори, розробленої для внутрішніх пристроїв у діапазоні 36 кВ. Ефект герметизації на полюсах поза приміщенням ще більше, оскільки можна інтегрувати вимірювальні котушки всередині полюса.

Вакуумний вимикач VD4 evo (рис. 5) – це наступне покоління, оснащене інтегрованими датчиками для дистанційного управління активами, оптимізації обслуговування та зниження експлуатаційних витрат.

Цифрові оновлення, включаючи датчики, можна додавати до існуючих конструкцій VD4 evo, що дозволяє безперешкодний перехід від традиційних до цифрових систем. Найновіші інновації підтримують цифровий підхід та готові до інтеграції в цифрові підстанції, які є ключовими для розробки інтелектуальніших мереж.

Вакуумні вимикачі Siemens Energy як і вимикачі ABB забезпечують високу надійність, гарантовану протягом 10 000 робочих циклів, проте новіші конструкції компанії ABB потенційно досягають 100 000 циклів завдяки вдосконаленим механізмам. Проста, міцна конструкція з невеликою кількістю рухомих частин притаманна вимикачам Siemens Energy. Вимикачі компанії ABB мають винятково міцну конструкцію, яка витримує більшу кількість комутаційних операцій, пропонує більше варіантів приводів для спеціалізованих застосувань, таких як серводвигуни для сталеливарних заводів або синхронізація для забезпечення якості електроенергії. Siemens Energy обробляє широкий діапазон напруг до 800 кВ з послідовним включенням. ABB часто пропонує вищі номінальні напруги для певних моделей.



Рисунок 5 – Нове покоління вимикачів Компанії ABB

Хоча General Electric не є основним піонером вакуумних вимикачів, еволюція цієї технології, пройшла шлях від ранніх демонстрацій вченими, такими як Р.В. Соренсен до комерційних продуктів [3]. Ключові досягнення включали використання осевих магнітних полів (ОМП) для покращення переривання дуги, розробку пружинних механізмів та широке впровадження вакуумних вимикачів у системах середньої напруги, замінивши старіші вимикачі, що працюють на нафті та газі. Використання вакууму як ізоляційного середовища для автоматичних вимикачів було повільним через проблеми з підтримкою високого вакууму та пошуком відповідних матеріалів. Перші комерційні вакуумні вимикачі стикалися з такими проблемами, як витіки та «переривання струму», але вони проклали шлях для майбутніх розробок. Значним досягненням стало впровадження електродів ОМП, що покращило стабільність дуги та можливості переривання струму [4]. Це дозволило забезпечити стабільніші режими дуги та вищу продуктивність. Починаючи з 1970-х років, конструкції еволюціонували від великих монолітних структур до більш ефективних та надійних пост-ізоляторних конструкцій. Соленоїдні приводи поступово замінялися пружинними механізмами з накопиченою енергією, які є більш надійними. Пізніші інновації включали розробку ефективніших та низькоенергетичних механізмів керування на основі постійних магнітів для усунення таких проблем, як явища стрибків та відскоків. До кінця 1970-х та початку 1980-х років вакуумні вимикачі стали кращим вибором для застосувань середньої напруги (до 52,5 кВ) завдяки своїй надійності, низьким експлуатаційним витратам та екологічним перевагам порівняно з альтернативами на основі оливи та елегазу. Хоча елегаз все ще поширений у високовольтних системах, очікується, що вимикачі з часом замінять їх через екологічні проблеми та постійний технологічний прогрес.

Компанія General Electric пропонує вакуумні вимикачі переважно для систем середньої напруги, як правило, з номінальною напругою до 15 кВ (кіловольт) або 38 кВ. На рис. 6 представлений вакуумний автоматичний вимикач VSG-24 24 кВ вкатного типу призначений для використання в енергосистемах 24 кВ, забезпечуючи захист та керування для різних промислових та гірничодобувних застосувань. Він ідеально підходить для перемикачів навантажень та виконання частих операцій, включаючи відключення струмів короткого замикання.

Автоматичний вимикач має нову конструкцію з вбудованим полюсом міжнародного бренду, що забезпечує довговічність та надійність у складних умовах. Завдяки механізму роботи, що не потребує обслуговування, та високому рівню механічного електричного терміну служби, цей продукт пропонує економічно ефективну експлуатацію та обслуговування.



Рисунок 6 – Критий автоматичний вимикач VSG -24 24 кВ компанії General Electric

Кількість робочих циклів вакуумних вимикачів General Electric значно варіюється залежно від конкретної моделі, номінальної напруги та застосування. Деякі моделі можуть бути розраховані на 10 000 або 30 000 робочих циклів, тоді як інші можуть мати різний термін служби або певну кількість циклів для різних типів операцій (наприклад, нормальний режим проти короткого замикання).

Майбутнє вакуумних вимикачів світле, оскільки технології продовжують розвиватися, щоб задовольнити потреби сучасних електричних мереж.

Одним із найважливіших напрямків розвитку є підвищення номінальних напруг вакуумних вимикачів. Хоча вакуумні вимикачі наразі є найефективнішими в діапазоні середньої напруги, очікується, що досягнення в матеріалах, конструкції та технологіях виробництва дозволять розробляти вакуумні вимикачі для надвисоковольтних застосувань (понад 145 кВ). Ці вакуумні вимикачі наступного покоління відіграватимуть вирішальну роль у високовольтних мережах передачі, зменшуючи потребу в елегазових розподільчих пристроях (КРУ) та пропонуючи більш екологічно чисті альтернативи.

У міру того, як світ рухається до більш інтелектуальних та взаємопов'язаних мереж, роль вакуумного вимикача в цій екосистемі стане більш помітною. У майбутньому ми можемо очікувати посилення інтеграції з технологіями інтелектуальних мереж, що дозволить вакуумним вимикачам взаємодіяти з іншими пристроями в мережі. Ці інтелектуальні вимикачі надаватимуть дані про стан мережі в режимі реального часу, виявлятимуть несправності до їх виникнення та навіть автоматично ізолюватимуть несправні ланцюги, щоб мінімізувати перебої. Передові датчики та аналіз даних дозволять операторам прогнозувати несправності з більшою точністю, допомагаючи запобігати дорогим перебоям та підвищуючи загальну надійність системи.

Ще одним перспективним напрямком майбутнього вакуумних вимикачів є застосування нанотехнологій та передових матеріалів. Нові матеріали з кращими ізоляційними властивостями можуть дозволити вакуумним вимикачам обробляти ще вищі напруги та струми. Дослідження наноматеріалів, таких як вуглецеві нанотрубки та графен, можуть призвести до розробки більш довговічних та ефективних компонентів для вакуумних вимикачів.

Оскільки екологічні проблеми продовжують зростати, вакуумні вимикачі, ймовірно, матимуть ще більший попит завдяки своїй екологічності. На відміну від елегазових вимикачів, вакуумні вимикачі не виробляють шкідливих газів і не сприяють глобальному потеплінню, що робить їх ідеальним рішенням для стійких енергетичних мереж. Тенденція до більш екологічних, більш стійких технологій продовжуватиме стимулювати впровадження вакуумних вимикачів.

**Висновок.** Технологія вакуумних вимикачів пройшла шлях від експериментального впровадження в 1960-х роках до широкого розповсюдження в сучасних мережах відносно низького рівня напруги. Вакуумні вимикачі зарекомендували себе як надійні, ефективні та екологічно чисті. Такі компанії, як Siemens Energy, ABB є провідними виробниками у цій галузі і відіграють ключову роль у розвитку цих технологій. Їхній досвід та інновації допомогли розширити межі можливостей вакуумних вимикачів, гарантуючи, що вони відповідають постійно зростаючим потребам електротехнічної промисловості. З огляду на незначну кількість встановлених вакуумних вимикачів у мережах високої напруги актуальні подальші дослідження їх роботи та удосконалення конструкції.

#### Список використаних джерел

1. Siemens Energy [www.siemens-energy.com](http://www.siemens-energy.com)

2. ABB <https://www.abb.com/global>
3. General Electric [www.ge.com](http://www.ge.com)
4. Sehrawat S., Pandey K. Evolution of vacuum circuit breakers and the role of Axial Magnetic Field (AMF) technology. – *IEEE, International Conference on Recent Developments in Control, Automation and Power Engineering (RDCAPE)*, 2015. <https://doi.org/10.1109/RDCAPE.2015.7281414>

УДК 629.58

Федорак В. В., Бабкін Г. В., к.т.н.

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв

## МОДЕЛЮВАННЯ ГІДРОТЕХНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК РУШІЇВ ТЕЛЕКЕРОВАНОВОГО ПІДВОДНОГО АПАРАТУ

Безпілотні технології з кожним днем все більше проникають у наше життя, охоплюючи нові сфери діяльності, освоюючи не лише повітряні та земні простори, а й морські. Це явище обумовлюється постійним прогресом у галузі робототехніки, що дозволяє дронам виконувати все більш складні та відповідальні завдання, а також вимогами до зниження ризику щодо людського життя та здоров'я. Ці обставини підтверджують актуальність подібних розробок та є сприятливими умовами їхнього розвитку. На сьогоднішній день існує велика кількість різноманітних підводних дронів.

**Метою** цієї роботи є проектування прототипу експериментального ТПА з водометними рушійми. Діяльність знайшли рішення такі задачі:

- висвітлено галузі застосування ТПА;
- проведено огляд найпопулярніших існуючих цивільних моделей ТПА, а також наведено їх основні характеристики;
- проаналізовано гідродинамічні сили опору, що діють на корпус апарату;
- розділі розраховані основні параметри рушіїв ТПА;
- створено твердотільну ЕЕ-моделі течії в проточній частині водометних рушіїв;
- проведено чисельне дослідження в'язкої течії в проточній частині водометних рушіїв;
- пояснено пристрій ТПА, також розроблено його конструкцію та компонування;
- приблизно розрахована вартість компонентів прототипу.

На ранніх етапах розвитку морської безпілотної робототехніки оператор був радий просто повернути свій ТПА після виконання завдання, минаючи увагою якість її виконання. Сьогодні дрони стали дуже надійним інструментом як у прибережних операціях, так і роботах у відкритому морі комерційними, урядовими, військовими та академічними користувачами. На відміну від ранніх «літаючих камер відеоспостереження», сучасні ТПА охоплюють завдання від перевірки небезпечних елементів усередині атомних електростанцій до ремонту складних глибоководних виробничих систем на шельфі нафтогазової промисловості.

ТПА використовуються:

- для оглядових робіт;
- для рятувальних операцій;
- для остропки та вилучення великих предметів з дна;
- для робіт із забезпечення об'єктів нафтогазового комплексу (підтримка буріння, огляд трас газопроводів, огляд структур на наявність полумок, виконання операцій з вентилями та засувками);
- для операцій з розмінування, для наукових додатків, для підтримки водолазних робіт;
- для робіт з підтримки рибних ферм, для археологічних досліджень;
- для огляду міських комунікацій, для огляду суден на наявність контрабандних товарів, прикріплених зовні до борту та ін;
- виступаючи в ролі помічника для забезпечення безпеки дайвера та надання допомоги.

Коло розв'язуваних завдань постійно розширюється, і парк апаратів стрімко зростає. Робота апаратом набагато дешевша за дорогі водолазні роботи незважаючи на те, що початкові вкладення досить великі.

Частина повної енергії, що йде на подолання сил гідродинамічного опору, що виникають при русі реальної рідини трубами і каналами, втрачається для даної системи (мережі) безповоротно. Ця втрата енергії зумовлена незворотним переходом механічної енергії (роботи сил опору) у теплоту. Тому під гідродинамічним опором або втратами мається на увазі величина, що дорівнює безповоротній втраті повної енергії на даній ділянці.

Відношення втраченої повної енергії (потужності) потоку до кінетичної енергії (потужності) або втраченого повного тиску, що опосередковано за масовою витратою, до динамічного тиску в обумовленому перерізі називають коефіцієнтом гідродинамічного опору [1].

Таким чином, для розрахунку основних параметрів ТПА необхідно спочатку визначити силу гідродинамічного опору шляхом чисельного моделювання обтічності корпусу ТПА.

Полагається, що ТПА має два горизонтально розташованих осьових рушія для руху по горизонталі, і два вертикально розташованих осьових рушія для руху по вертикалі. Також він має нульову плавучість, тобто сила тяжкості і архімедова сила для нього компенсовані.

Чисельне моделювання обтікання корпусу було здійснено за допомогою програмного розширення Fluent, що є обчислювальним інструментом для моделювання потокових процесів в середовищі (CFD-аналіз), повністю вбудованим в Ansys Workbench. Проведення подібного розрахунку швидше та дешевше, ніж виготовлення прототипу або моделі, оснащення датчиками, проведення циклу випробувань та отримання даних, придатних для подальшої роботи. Fluent дозволяє досліджувати відразу декілька варіантів або можливих конфігурацій і отримати наочніші результати: будь-які параметри доступні для аналізу – швидкість, тиск, щільність, температура – безпосередньо на моделі.

Порядок побудови BD-моделі розрахункової галузі складається з наступних етапів:

- створення тривимірної твердотільної моделі лопатевої системи;
- створення тривимірної моделі повної розрахункової області проточної частини;
- поділ повної розрахункової області область робочого колеса і область виправляючого апарату;
- створення розрахункової області робочого колеса (один міжлопатевий канал);
- створення розрахункової області апарата, що виправляє (один міжлопатковий канал).

Оскільки підводні транспортні засоби стають дедалі надійнішими та доступнішими, одночасне використання кількох ТПА стало можливим, і очікується, що узгоджене використання кількох апаратів стане звичайним явищем у наступні роки. Це не тільки дозволить здійснювати нові типи операцій, які залежать від комунікації, але також дозволить кожному окремому члену групи користуватися навігаційною інформацією, отриманою від інших учасників. Для оптимальної спільної локалізації можна використовувати кілька спеціально призначених навігаційних допоміжних підводних апаратів, які підтримують точну оцінку розташування через складні датчики, і можуть дозволити набагато більшій групі транспортних засобів з менш складними комплектами датчиків підтримувати точне положення.

Існує п'ять основних технологій, на які проєктувальник повинен спиратися під час вибору навігаційної системи:

- сенсорне зондування;
- GPS;
- акустична навігація по ретранслятору;
- навігація картою;
- спільна навігація кількох транспортних засобів.

Як було зазначено, ТПА пов'язаний з радіостанцією кабелем, що дозволяє використовувати більш ємний акумулятор без необхідності підвищення маси апарату. Також у разі розрядки або пошкодження дрону та нездатності здійснення його спливання за допомогою рушіїв завжди буде можливість підняти його на поверхню.

Останнім часом спостерігається підвищена тенденція використання 3D-друку та активна її інтеграція у виробництво та повсякденне життя, причому друк здійснюється як металами та пластиками, так і живими клітинами, так званий BD-біопринтинг, що відіграє велику роль у медицині.

У виробництві прототипів та експериментальних моделей BD-друк має явну перевагу перед литтям, дозволяючи друкувати скільки завгодно складні та різноманітні геометрії моделей, зважаючи на відсутність необхідності форми.

**Висновки.** У ході роботи було здійснено розрахунок основних параметрів дрону, адаптовано і чисельно досліджено лопатеву систему його водометного рушія, побудовано тривимірну модель течії в проточній частині водометного рушія, зроблено дискретизацію та подальший розрахунок проточної частини водометного рушія, побудовано тривимірну модель ТПА (розроблено та тривимірну модель ТПА).

Істинність проведеного розрахунку підтвердила результати дослідження в комплексі ANSYS. Параметри близькі до розрахованих. Похибка пояснюється недостатністю густоти сітки, оскільки доводилося робити сітку грубішою, збільшуючи розмір осередків через обмеженість у комп'ютерних ресурсах.

Проблема проєктування рушіїв полягає в необхідності для розробника знаходити рішення відразу двом завданням: визначення потужності двигуна необхідної для здійснення бажаної швидкості ходу корпусу, і знаходження можливої швидкості ходу судна при потужності двигуна. Виходячи з цього, рекомендується надалі

виготовити дослідний зразок дрону для польових випробувань та порівняти отримані експериментальні дані з даними, отриманими під час розрахунків.

#### Список використаних джерел

1. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. – М. : Машиностроение, 1992. – 672 с.
2. Боженков Ю. А. Самоходные необитаемые подводные аппараты. – Л. : Судостроение, 1986. – 264 с.
3. Бородин В. И. Гидроакустические навигационные средства. – Л. : Судостроение, 1983. – 262 с.
4. Войтов Д. В. Телекерируемые необитаемые подводные аппараты. – М. : АСТ, 2002. – 303 с.
5. Голиков В. А. Разработка и численное исследование лопастной системы осевого насоса. – СПб. : Изд-во Политехнического университета, 2016. – 220 с.
6. Дмитриев А. Н. Проектирование подводных аппаратов. – Л. : Судостроение, 1978. – 236 с.
7. GAO Fu-dong, PAN Cun-yun, XU Xiao-jun, HAN Yan-yan, numerical computation and analysis of high-speed autonomous underwater vehicle (AUV) moving в head sea based на dynamic mesh, 2012. – 3093 з.
8. MSM Aras, FAAzis, MNOthman, SSAbdullah, A Low Cost 4 DOF Remotely Operated Underwater Vehicle Integrated With IMU and Pressure Sensor, 2012. – 23 с.
9. Manhar R. Dhanak, Nikolaos I. Xiros. Springer Handbook of Ocean Engineering, New York, 2016. – 1345 с.
10. Mohd Amin Hakim Ramli. Preliminary Design and Analysis Study of Propeller for Autonomous Underwater Vehicle (AUV), 2018. – 278 с.

УДК 621.314

Ставинський Р. А., к.т.н., Авдеева О. А., к.т.н., Савченко О. В.

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв

## СИСТЕМА ЕЛЕКТРОПРИВОДУ АВТОМАТИЧНОЇ ВЕНТИЛЯЦІЇ ГЕНЕРУЮЧОГО АГРЕГАТУ СУДНОВОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ

Питання зниження маси і габаритних розмірів елементів електрообладнання набувають першорядної актуальності в умовах жорстких обмежень по масогабаритним характеристикам вузлів і систем суднових механізмів. Основними елементами у складі електромеханічних систем являються електродвигуни і трансформатори, які є габаритними і металоємними виробами та у більшості випадків визначають масу і габарити усієї системи. Відповідно до [1], одним зі способів зниження маси і габаритів силового електрообладнання є підвищення електромагнітних навантажень, що у свою чергу збільшує їх нагрів.

**Метою роботи** є обґрунтування технічних рішень, що забезпечують зниження масогабаритних показників суднової генеруючої установки.

Запропоновано систему автоматичного управління збудженням генеруючої установки суднової енергетичної установки, що відповідає сучасним тенденціям енерго- та ресурсозбереження. Зниження масогабаритних показників і забезпечення енергозбереження в генеруючій установці можливо на основі використання вбудованої автоматичної примусової вентиляції. Така вентиляція повинна включатися при досягненні однією з обмоток синхронного генератора і трансформаторів, що входять в систему, заданої температури. Крім того, згідно з [1], складові елементи системи електрообладнання доцільно об'єднувати в єдині функціонально з'єднані вентилязовані агрегати. При цьому підвищується питома енергетична ємність і коефіцієнт корисної дії (ККД) двигуна примусової вентиляції.

Означений метод енергоресурсозбереження в судновій енергетичній системі пояснюється рис. 1, на якому представлені особливості запропонованих технічних рішень.

На електричній схемі (див. рис. 1) показана одна з відомих систем [2] для автоматичного регулювання збудження суднових синхронних генераторів. Відповідно до означеної вище концепції, агрегат доповнено електроприводом автоматичної примусової вентиляції.

Зазначені схема і агрегат містять синхронний генератор (СГ) з самозбудженням від керованого випрямляча (КВ) з силовими вентилями, закріпленими на одній зі стійок корпусу. У корпусі також закріплено трансформатор фазового компаундування (ТФК) і трансформатор напруги (ТН) для живлення коректора напруги (КН) з пристроєм зсування фази (ПФ) керованих вентилів (КВ). Для забезпечення форсованого охолодження генератора і елементів автоматичного регулювання збудження система містить вентилятор з торцевим асинхронним двигуном (ДВ). Електропривод вентиляції також містить пускач у вигляді лінійного контактора Л з котушкою ЛК,

підключеної до виходу блоку управління БУ вентилятором. Для управління електроприводом використовується коло вимірювання температури з групами позисторів  $R_r$ ,  $R_{фк}$  і  $R_n$ , вбудованих відповідно в фази СГ, ТФК і ТН.

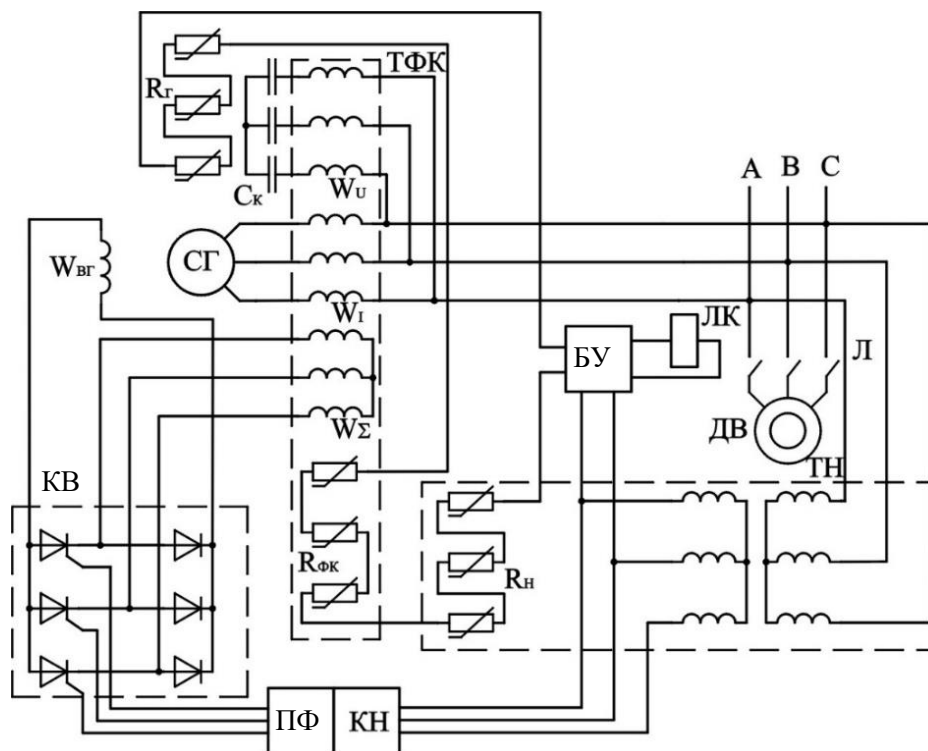


Рисунок 1 – Принципова електрична схема генеруючого агрегату з примусовою вентиляцією

У системі (див. рис. 1), що розглядається, додатково до примусової вентиляції, доцільно використання циліндричного (за формою) виконання і осьового встановлення комплектного електрообладнання. При проектуванні трифазних трансформаторів для вказаних систем, доцільно використання компактних симетричних просторових магнітопроводів, наприклад [3]. Такі трансформатори забезпечують кращі масогабаритні показники і відповідність конфігурації їх активної частини спрямованому вздовж осі агрегату потоку повітряного охолодження.

Особливості компоновки та взаємного розташування елементів електромеханічної системи суднового генеруючого агрегату показані на рис. 2.

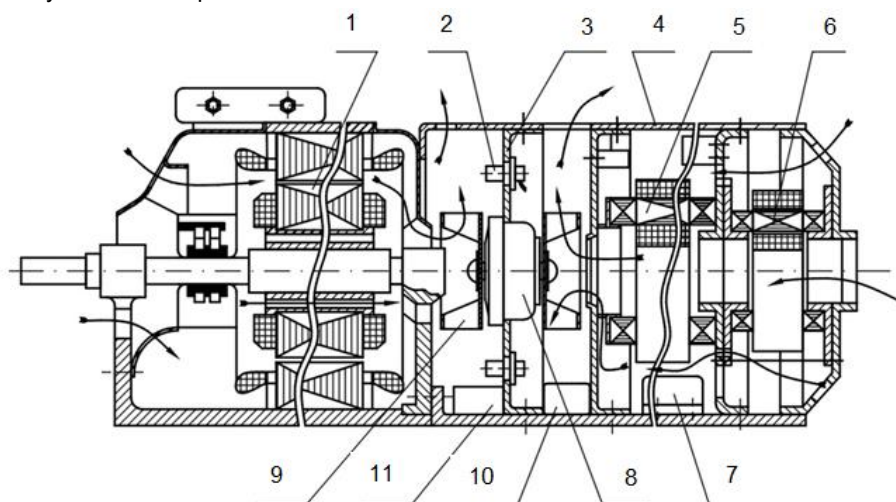


Рисунок 2 – Конструктивна схема генеруючого агрегату:

1 – синхронний генератор; 2 – силові вентилялі; 3 – стійки корпусу; 4 – корпус; 5 – трансформатор фазового компаундування; 6 – трансформатор живлення блоку коректора напруги; 7 – коректор напруги; 8 – торцевий асинхронний двигун; 9 – робоче колесо вентилятора; 10 – магнітний пускач; 11 – блок управління вентилятором

У схемах регульовано дросельного і тиристорного асинхронного електропривода з позитивною зворотним зв'язком за струмом і від'ємним зворотним зв'язком за напругою трифазні трансформатори і дроселі використовуються в колах зворотного зв'язку за напругою для передачі сигналів, пропорційних напрузі двигуна.

Елементами, які визначають масогабаритні показники автоматичних ємнісних і тиристорних фільтро-компенсаційних пристроїв системи електропостачання і тиристорних регуляторів напруги, являються трифазні дроселі і узгоджуючи трифазні трансформатори.

В пристроях забезпечення самозапуску електродвигунів з груповим захистом мінімальної напруги, кола котушок магнітних пускачів отримують живлення від випрямлячів, які працюють паралельно. При цьому кожен з випрямлячів підключений до незалежного джерела електропостачання через трифазні поділювані трансформатори малої потужності, які узгоджують номінальні параметри кіл постійного і змінного струмів. При перервах живлення котушок управління контакторів від другого джерела.

Усі означені системи можуть бути виконані у відповідності до схеми (рис. 2), що суттєво покращить їх технічний рівень.

**Висновки.** На основі наведеного прикладу реалізації системи автоматичного регулювання збудження судового синхронного генератора у вигляді єдиного блочного агрегату, який доповнено електроприводом примусової вентиляції, показано можливість зниження габаритів і маси судових електромеханічних систем, що підвищує їх технічний рівень та задовольняє сучасним вимогам енергоресурсозбереження.

#### Список використаних джерел

1. Способы энергоресурсосбережения в судовой силовой электротехнике на основе встроенной принудительной вентиляции / А. А. Ставинский, В. К. Чекунов, О. О. Плахтырь и др. // Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы. – 2002. – № 1. – С. 133–137.
2. Фрейдзон И. Р. Судовые автоматизированные электроприводы и системы. – Л.: Судостроение, 1988. – 472 с.
3. Ставинский Р.А. Особливості конструкції, технології та електромагнетних процесів трифазних трансформаторів малої потужності з просторовим магнетопровідом // Технічні вісті. – 2000. – № 1(10), 2(11). – С. 107–108.

УДК 629.064.5

Зінчук В. В., Чекунов В. К.

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв

## ВИКОРИСТАННЯ ГІБРИДНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК НА СУДНАХ

Розвиток систем електричного руху суден – один із ключових трендів у морській і річковій галузі, спрямований на підвищення екологічності, ефективності й надійності морського транспорту. Гібридні енергетичні установки побудовані за рахунок комбінації електродвигунів з дизельними, газовими або водневими установками. Це дозволяє знизити витрати палива й викиди, особливо при маневрах у портах і на малих швидкостях.

Що рухає переходом до гібридних суден:

- посилення норм по викидах парникових газів і забрудненню повітря, це стимулює судовласників шукати альтернативи класичним дизель-двигунам;
- розвиток батарей, накопичувачів енергії й електричних систем на судах, відзначається ріст щільності батарей, зменшення часу зарядки/стикування;
- розвиток інфраструктури в портах: порти всі частіше готують підключення для «холодного» електроживлення суден (shore power) і електропідзарядки.

Конкретні зміни по типах/сегментах:

- коротко магістральні пасажирські судна (пороми й т. п.): тут електричний рух найбільше розвинений. Наприклад, один зі звітів відзначає, що «більше 55 % коротких маршрутних пасажирських суден» уже використовують електричні системи;
- середнього розміру вантажні судна, допоміжні судна (допоміжні офшори-судна, буксири), в них гібридні або електричні системи всі частіше застосовуються.
- контейнеровози й судна великого океанського класу: тут прогрес є, але він значно повільніше. Наприклад, відзначено, що електросистеми поки не можуть впоратися з далекими океанськими маршрутами по батареях.

Числові показники й прогнози: огляд Pacific Environment відзначає, що за станом на 2024 рік було вже ~1000 суден з батареєю електричними системами, і очікується ще ~375 з побудовою в 2025-м.

Основні напрямки розвитку:

- збільшення частки нових суден, проєктованих з частковим або повним електричним приводом, або гібридного;
- перетворення існуючого флоту через Ретрофіт и (доповнення батарей, електромоторів) – особливо для допоміжних/прибережних суден;
- розробка й впровадження могутніших батарей й енергоємних систем, що дозволить розширити дальність електроплавання;
- створення й модернізація портової інфраструктури для живлення електросуден (shore-power, зарядки, модульні батарейні системи);
- експлуатаційні переваги: менше шум, вібрації, час технічного обслуговування, економія палива.

Обмеження й виклики:

- обмежена дальність для повністю електричних систем на більших морських маршрутах: батарей поки недостатньо, більші акумуляторні маси "з'їдають" вантажопідйомність;
- високі первісні інвестиції: електросистеми дорожче, інфраструктура ще не повсюдна;
- необхідність модернізації портової інфраструктури й стандартизації зарядки/живлення.

Що можна чекати в найближчі роки:

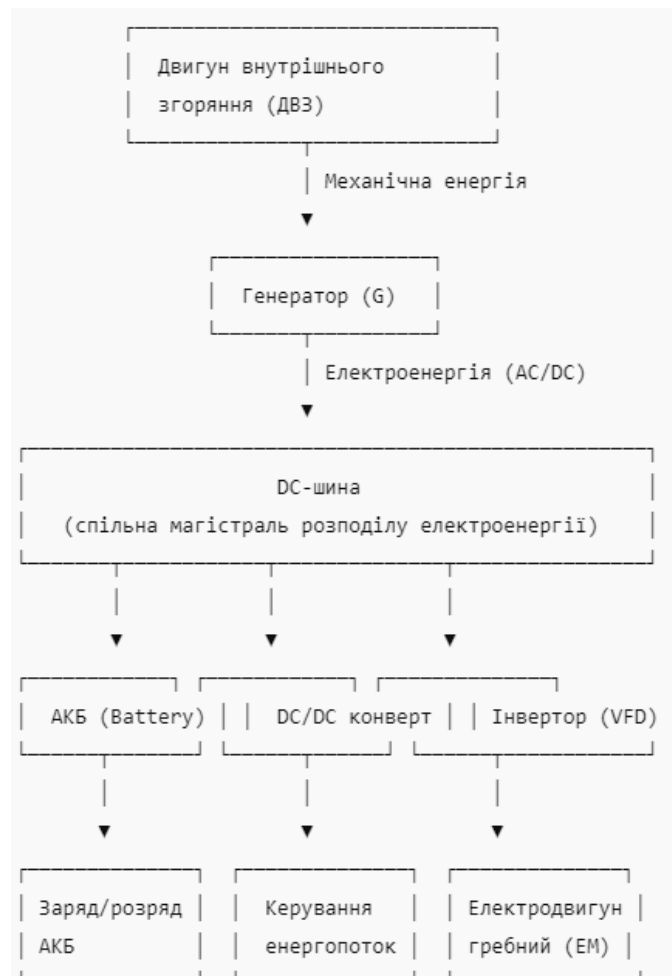
- збільшення частки нових пасажирських і короткомагістральних вантажних суден з електричним або гібридним приводом – можливо, до 30–40 % нових замовлень;
- поступове розширення застосування електроруку на середніх маршрутах і допоміжних суднах;
- для більших океанських контейнеровозів/балкерів: скоріше гібридні системи і допоміжні електромотори, чим повністю батарейні ще найближчі 5–10 років;
- прискорення впровадження електропорта – інфраструктури, зарядки й модульних батарейних систем;
- зниження витрат на батареї й збільшення їхньої енергоємності, що приведе до розширення зони застосування;
- сучасна тенденція до зниження викидів CO<sub>2</sub>.

Зараз гібридні системи будуються як компроміс між дизельними і електричними установками.

Класифікація гібридних енергетичних установок:

| Ознака класифікації         | Типи                                                                                                  | Характеристика / приклади застосування                                         |
|-----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| За типом джерел енергії     | Дизель-електричні.<br>Газоелектричні.<br>Акумуляторно-дизельні.<br>Сонячно-дизельні.<br>Вітродизельні | Поєднання традиційних (ДВЗ) і відновлюваних джерел для зменшення витрат палива |
| За принципом роботи         | Послідовна схема.<br>Паралельна схема.<br>Комбінована схема                                           | Визначає взаємодію енергетичних джерел у системі живлення                      |
| За типом споживачів         | Суднові.<br>Наземні транспортні.<br>Стаціонарні (енергокомплекси)                                     | Розрізняють за характером навантажень і режимами роботи                        |
| За способом керування       | Автоматизовані.<br>Напівавтоматичні.<br>Ручного керування                                             | Від рівня автоматизації залежить ефективність та стабільність роботи системи   |
| За рівнем електрифікації    | Частково електрифіковані.<br>Повністю електрифіковані                                                 | Визначає частку електричної енергії у загальному енергетичному балансі         |
| За видом споживаної енергії | Електричні. Теплоелектричні.<br>Механічно-електричні                                                  | Залежно від кінцевої форми енергії, яка використовується для руху чи живлення  |
| За призначенням             | Суднові енергетичні установки.<br>Берегові гібридні системи                                           | Застосовуються у різних сферах транспорту та енергетики                        |
| За екологічними показниками | З низькими викидами CO <sub>2</sub> .<br>З відновлюваними джерелами.<br>З системами рекуперації       | Орієнтовані на зменшення шкідливого впливу на довкілля                         |

Структурна схема гібридної енергетичної установки:



Основні елементи: дизель-генератор; акумуляторна батарея; електродвигун; перетворювач частоти; система управління (Energy Management System); суднова електромережа.

Переваги гібридних суден: зменшення витрати палива до 20–40 %; зниження викидів CO<sub>2</sub>, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>; робота в "екологічному режимі" у портах; менший шум і вібрації.

Недоліки гібридних суден: вища початкова вартість; складність обслуговування систем управління; необхідність додаткового навчання екіпажу.

Приклади гібридних суден:

"Color Hybrid" (Норвегія) – найбільше пасажирське гібридне судно у світі



“Ellen Ferry” (Данія) – найбільший у світі електро-гібридний пором



“Sea Change” (США) – воднево-гібридне судно



Фінська технологічна група Wärtsilä підписала контракт на встановлення першої у світі суднової системи акумулювання енергії. Компанія змонтує батарейний комплекс на великотоннажному офшорному судні постачання North Sea Giant, одному з найбільших у світі кораблів у своєму класі.

North Sea Giant



Система акумулювання енергії підвищить експлуатаційну ефективність судна та суттєво знизить обсяг його викидів. Це відповідає екологічним вимогам суден, що працюють у норвезькому секторі Північного моря, повідомляє World Oil.

Справа в тому, що North Sea Giant (власник – компанія North Sea Shipping AS) має систему динамічного позиціонування, яка вимагає для свого функціонування постійної роботи, як мінімум, двох двигунів. Це призводить до значної витрати пального. Однак створення гібридної системи енергопостачання дозволить забезпечити резервне живлення, внаслідок чого навантаження основних силових установок знизиться, також установка системи акумулювання дозволить скоротити емісію CO<sub>2</sub> на 5,5 млн. тонн на рік, окису азоту – на 30 тонн, а окису сірки – на 1,2 тонни.

Натомість існує один важливий момент. Оскільки на офшорні судна постачання такого класу батарейні комплекси ніколи раніше не ставилися, зміни, внесені до конструкції North Sea Giant, вимагатимуть схвалення будь-якого зі світових суднових класифікаторів. У зв'язку з цим Wärtsilä вже зараз домовляється з DNV і GL про видачу судну нового сертифікату.

Український можливий напрямок розвитку повністю електричного або гібридного флоту:

1. Використання потенціалу річкового транспорту: Дніпро, Південний Буг, Дунай.
2. Використання гібридів у портових буксирах та річкових катерах.
3. Можливість локалізації збірки систем у Миколаєві, Херсоні, Одесі.

Етапи впровадження

1. Пілотні судна з дизель-електричними системами.
2. Розробка стандартів і вимог безпеки.
3. Створення інфраструктури зарядки.
4. Масове впровадження у транспортних компаніях.

Для аналізу необхідності впровадження можна розглянути економічне порівняння

| Показник           | Дизельна установка | Гібридна установка |
|--------------------|--------------------|--------------------|
| Початкова вартість | 1.0×               | 1.3–1.6×           |
| Витрата палива     | 100 %              | 60–80 %            |
| Обслуговування     | Високі витрати     | Середні            |
| Термін окупності   | –                  | 5–7 років          |

*Структурований огляд типових схем гібридних енергетичних установок для суден.*

### I. Послідовний гібрид (Series Hybrid)

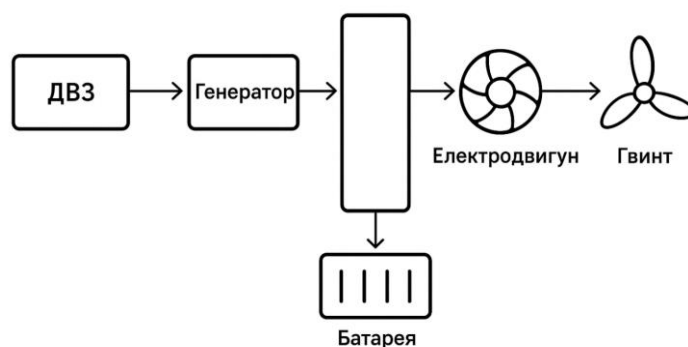
Принцип роботи: двигун внутрішнього згоряння (ДВЗ) працює виключно як генератор електроенергії.

Електроенергія йде на тягові електродвигуни або на зарядку батарей. ДВЗ не підключений безпосередньо до гвинтів.

Переваги: просте керування потужністю; можливість оптимізувати ДВЗ для постійного режиму роботи.

Недоліки: подвійні перетворення енергії (механічна → електрична → механічна); може бути менш ефективним при великих навантаженнях.

*Структурна схема послідовного гібриду*



### II. Паралельний гібрид (Parallel Hybrid)

Принцип роботи: ДВЗ може безпосередньо приводити гвинт; електродвигун може допомагати або замінювати ДВЗ при низьких швидкостях; ДВЗ та електродвигун працюють разом або окремо.

Переваги: висока ефективність на всіх швидкостях; можливість повністю електричного руху на короткі відстані.

Недоліки: складніша система керування.

*Основні компоненти паралельної ГЕУ на судні:*

1. Дизель-генератор (ДГ). Постачає механічну або електричну енергію. Використовується для головного приводу судна та зарядки батарей.
2. Електродвигун (ЕД). Виконує функцію основного або допоміжного приводу. Може працювати як мотор або генератор (при рекуперації).

3. Батарейний блок/акумуляторна система (АКБ). Зберігає електроенергію для роботи електродвигуна. Забезпечує роботу при малих швидкостях або в порту.

4. Силова електроніка (інвертори, перетворювачі). Контролює подачу електроенергії від акумуляторів до двигуна. Забезпечує синхронізацію роботи ДГ та ЕД.

5. Головний вал та гребний гвинт. Приймає механічну енергію від ДГ або ЕД. Може працювати одночасно від двох джерел (паралельний режим).

6. Система управління (SCADA або локальний контролер). SCADA – (Supervisory Control and Data Acquisition) – означає «диспетчерське управління та збір даних» – це система диспетчерського управління та збору даних, яка використовується для моніторингу, контролю та автоматизації процесів у реальному часі. Вона збирає дані з обладнання, візуалізує їх на екрані оператора, дозволяє керувати процесом, реагувати на сигнали тривоги та зберігати інформацію.

### III. Комбінований гібрид (Series-Parallel Hybrid)

Принцип роботи: поєднує переваги послідовного та паралельного гібридів. ДВЗ може працювати як генератор або підключатися безпосередньо до гвинта. Електродвигуни та батареї забезпечують додаткову потужність.

Переваги: гнучкість режимів роботи; висока ефективність у всіх діапазонах швидкостей.

Недоліки: найскладніша система керування та інтеграції.

Комбінована або послідовно-паралельна гібридна енергетична установка поєднує переваги обох типів:

Послідовної ГЕУ – коли ДВЗ приводить генератор, що живить електродвигун гребного вала.

Паралельної ГЕУ – коли ДВЗ і електродвигун можуть одночасно або окремо обертати гребний вал.

У комбінованій системі потік енергії може розподілятися як у механічному, так і в електричному контурі, що дає високу гнучкість у різних режимах (економічний хід, маневрування, резерв, рух з нульовими викидами).

#### Основні компоненти

1. Дизельний двигун (ДВЗ) – основне джерело механічної енергії.
2. Генератор-електромашини (ЕМ1) – працює як генератор або електродвигун залежно від режиму.
3. Гребний електродвигун (ЕМ2) – обертає гребний вал або працює як генератор під час рекуперації.
4. Акумуляторна батарея (АКБ) або суперконденсатори – накопичують надлишкову енергію.
5. DC-шина (постійного струму) – з'єднує всі джерела та споживачі.
6. Інвертор / перетворювач частоти – керує потоком енергії між АКБ, генератором і двигуном.
7. Гребний гвинт (ГГ).

Принцип роботи у послідовному режимі: ДВЗ → Генератор → Електродвигун → Гребний гвинт.

У паралельному режимі: ДВЗ і Електродвигун одночасно обертають вал (через редуктор або спільний вал).

Електричний режим: рух лише від АКБ (нульові викиди).

Рекуперація: гребний двигун працює як генератор під час гальмування або спуску швидкості.

### IV. Мікро-гібриди (Mild Hybrid / Assist Hybrid)

Принцип роботи: електродвигун невеликої потужності допомагає ДВЗ під час пуску або при пікових навантаженнях. Батарея заряджається від ДВЗ або при рекуперації.

Переваги: невеликі витрати на модернізацію; зменшення витрат палива та викидів.

Недоліки: не забезпечує повністю електричного руху.

Мікро-гібридна (Mild Hybrid/Assist Hybrid) енергетична установка (ГЕУ) використовується у суднових енергосистемах малого класу (переважно допоміжного або маневрового типу).

#### Суть мікро-гібридної системи

Мікро-гібрид (Mild Hybrid / Assist Hybrid) – це найпростіший тип гібридної установки, де електрична машина лише допомагає дизельному двигуну, але не може забезпечити самостійний рух судна.

Основна мета – покращення економічності, зниження викидів і підвищення ККД дизеля за рахунок рекуперації енергії при гальмуванні / зменшенні навантаження; електричного старту двигуна (Start-Stop); короткочасної допомоги при розгоні; стабілізації роботи допоміжних систем.

#### Основні компоненти

1. Дизельний двигун (ДВЗ) – основне джерело енергії.
2. Генератор-стартер (Belt Starter Generator, BSG) або ISG (Integrated Starter-Generator) – невелика електромашини, з'єднана з дизелем (через ремінь або муфту).
3. Акумуляторна батарея (АКБ) – вища ємність, ніж у звичайних системах (48 В або більше).
4. DC/DC перетворювач – для зв'язку між системою 48 В і бортовою мережею 12/24 В.
5. Контролер енергоменеджменту (EMS) – керує потоками енергії, режимами старт/стоп, рекуперацією.

*Принцип роботи*

| Режим                            | Опис роботи                                      | Потік енергії      |
|----------------------------------|--------------------------------------------------|--------------------|
| Старт/зупинка (Start-Stop)       | ЕМ запускає ДВЗ або вимикає його під час простою | АКБ → BSG          |
| Підсилення (Assist)              | ЕМ допомагає дизелю при розгоні / маневрах       | АКБ → BSG → ДВЗ    |
| Рекуперація (Regeneration)       | ЕМ працює як генератор при гальмуванні           | BSG → АКБ          |
| Заряд / живлення бортової мережі | BSG живить систему постійного струму через DC/DC | BSG → DC/DC → 24 В |

**V. Гібридна енергетична установка типу “Паливний елемент + Акумулятор** (Fuel cell + Battery hybrid H<sub>2</sub>/альтернативні палива).

(H<sub>2</sub>/альтернативні палива) – сучасний напрямок розвитку безвуглецевих суднових систем.

Суть системи Fuel Cell + Battery Hybrid: це повністю електрична або гібридна енергетична установка, де головним джерелом енергії є паливні елементи (Fuel Cells), які перетворюють хімічну енергію водню (H<sub>2</sub>) або альтернативних палив (метанол, аміак тощо) на електричну.

Акумуляторні батареї (АКБ) доповнюють систему, забезпечуючи пікову потужність, рекуперацію та стабілізацію енергомережі судна.

*Принцип роботи системи*

| Режим роботи                 | Опис процесу                                                         | Джерело живлення                            |  |
|------------------------------|----------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Нормальний (Cruise)          | Паливні елементи живлять DC-шину та двигуни; АКБ стабілізує напругу. | Fuel Cell → DC/DC → DC-шина → Інвертор → ЕМ |                                                                                      |
| Піковий (Boost / Peak Power) | АКБ додає енергію під час маневрування або різних навантажень.       | Fuel Cell + АКБ → DC-шина → ЕМ              |                                                                                      |
| Зарядка (Charging)           | Паливні елементи заряджають АКБ при низькому навантаженні.           | Fuel Cell → АКБ                             |                                                                                      |
| Рекуперація (Regeneration)   | ЕМ працює як генератор, повертаючи енергію в АКБ.                    | ЕМ → Інвертор → DC-шина → АКБ               |                                                                                      |
| Безпілотний / тихий режим    | Судно рухається лише від АКБ (без шуму та вібрацій).                 | АКБ → ЕМ                                    |                                                                                      |

Особливості та переваги системи: без вуглецеве живлення – відсутність CO<sub>2</sub>-викидів при використанні водню; високий ККД (до 60 %) завдяки електрохімічному процесу без згоряння; низький рівень шуму та вібрацій – підходить для пасажирських і наукових суден; модульність – паливні елементи можна масштабувати; екологічна безпека – придатна для зон з обмеженням викидів (ECA, Arctic, Baltic).

*Використовувані типи паливних елементів*

| Тип   | Паливо                           | Перевага                                     |
|-------|----------------------------------|----------------------------------------------|
| PEMFC | Водень (H <sub>2</sub> )         | Висока щільність потужності, швидкий запуск. |
| SOFC  | Амоніак, метанол                 | Може працювати на різних альт. паливах.      |
| PAFC  | Водень + CO <sub>2</sub> домішки | Підходить для тривалих рейсів.               |

## VI. Повністю електричне судно з береговою зарядкою і PV/вітроінтеграцією

Повністю електричне судно (Full Electric Ship, FE) з береговою зарядкою (Shore Power Charging) і інтеграцією відновлюваних джерел – сонячних панелей (PV) та вітрових турбін.

Суть системи «Повністю електричне судно (Full Electric Ship)».

Це судно, де відсутні традиційні двигуни внутрішнього згоряння, а всі енергоспоживачі живляться від електричної системи, головним джерелом якої є акумуляторні батареї.

Заряджання відбувається: від берегової зарядної станції (Shore Connection), від власних відновлюваних джерел (сонячні панелі, вітрові турбіни).

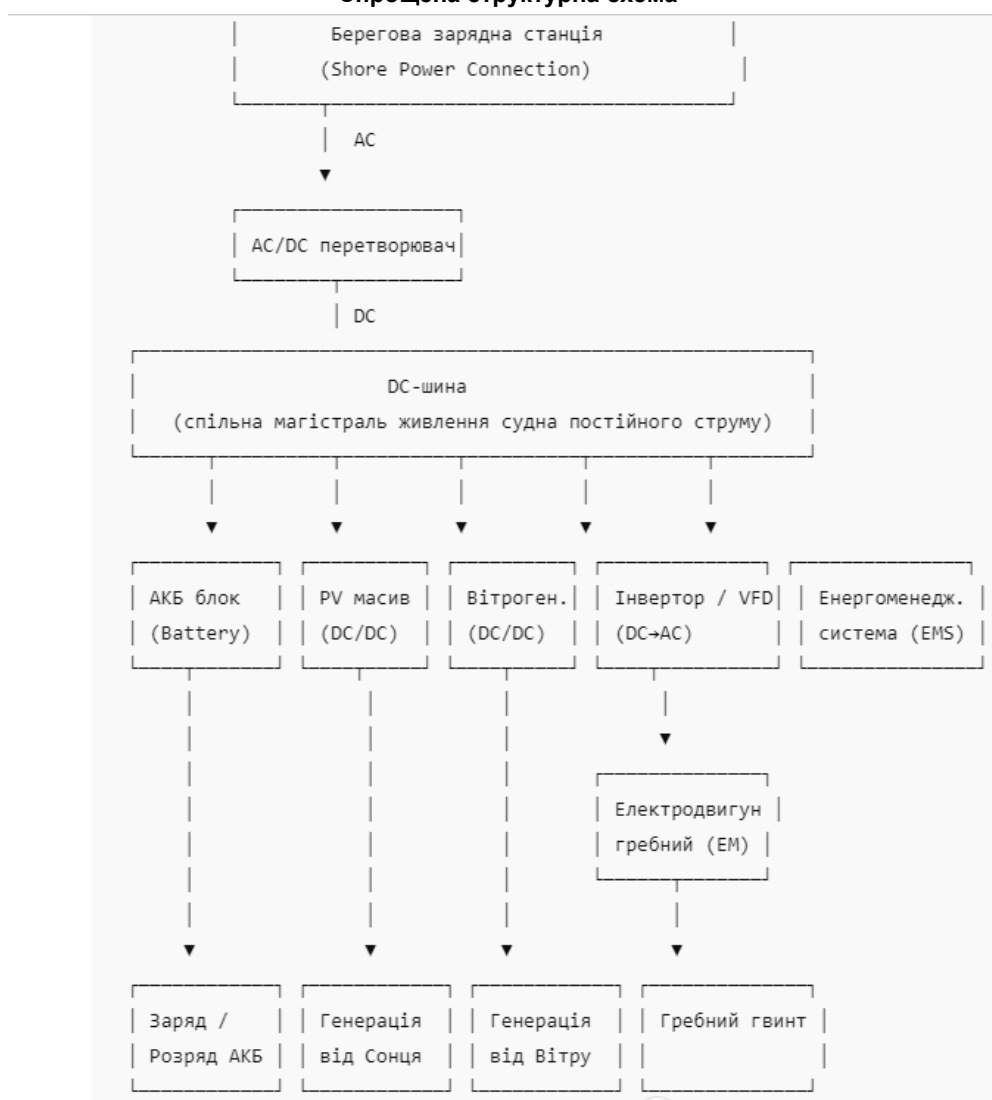
### Основні елементи системи

| Елемент                                            | Функція                                                                        |
|----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| ■ Акумуляторна батарея (Battery Bank)              | Основне джерело енергії судна.                                                 |
| ⚡ Берегова зарядна станція (Shore Power / Plug-in) | Заряджає АКБ у порту через високовольтний кабель.                              |
| ☀ Сонячні панелі (PV array)                        | Генерують постійний струм для підзарядки батарей.                              |
| □ Вітрова турбіна (Wind Generator)                 | Допоміжне джерело електроенергії під час руху.                                 |
| ⊙ DC/DC перетворювачі                              | Узгоджують напругу між джерелами (PV, Wind, Battery).                          |
| 💰 DC-шина (Main DC Bus)                            | Єдина магістраль постійного струму для розподілу енергії.                      |
| ⊙ Інвертори (VFD)                                  | Перетворюють DC → AC для живлення гребних електродвигунів і допоміжних систем. |
| ⚓ Гребні електродвигуни (EM Propulsion Motors)     | Обертають гребні гвинти.                                                       |
| 💡 Система енергоменеджменту (EMS)                  | Керує розподілом енергії, зарядом АКБ, PV/вітровими модулями.                  |

### Принцип роботи системи

| Режим                               | Джерело енергії                        | Опис                                                                  | 📄 |
|-------------------------------------|----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|---|
| 1 Берегова зарядка (Shore Charging) | Берегова станція → АКБ                 | Судно заряджає батареї в порту від мережі (через AC/DC перетворювач). |   |
| 2 Рух (Cruise Mode)                 | АКБ → Інвертор → EM                    | Судно рухається від енергії батарей.                                  |   |
| 3 Генерація PV / Wind               | PV + Wind → DC/DC → DC-шина → АКБ / EM | Відновлювані джерела заряджають батареї або живлять двигуни.          |   |
| 4 Рекуперація (Regeneration)        | EM → Інвертор → DC-шина → АКБ          | Під час гальмування енергія повертається в батареї.                   |   |
| 5 Стоянка / Енергозбереження        | PV + Wind → АКБ                        | Автоматичне підзаряджання від природних джерел.                       |   |

## Спрощена структурна схема



Особливості та переваги: нульові викиди CO<sub>2</sub> та NO<sub>x</sub> – екологічно чистий рух; “Silent operation” – мінімум шуму і вібрацій; можливість автономної роботи від PV/вітру під час стоянки; енергозбереження до 40 % завдяки рекуперації та “shore-to-ship”(з берега на судно) живленню.

Підходить для портових, пасажирських, дослідницьких суден.

Види берегового підключення. Стандарти та технічна база: IEEE/IEC/ISO 80005-1 – стандарт для високовольтного підключення суден (6,6 кВ, 50/60 Гц); 80005-2 – стандарти для малих суден (низьковольтне shore connection); OPS (Onshore Power Supply) – загальний термін, що охоплює всі системи.

| Тип                  | Напруга   | Особливість                                  |
|----------------------|-----------|----------------------------------------------|
| LVSC                 | 400–690 V | Для малих суден і катерів                    |
| HVSC                 | 6.6–11 kV | Для великих суден, швидке заряджання         |
| Inductive / Wireless | —         | Безконтактне заряджання (новітня технологія) |

**Висновки:**

Гібридні енергетичні установки – ефективний крок до декарбонізації флоту.

Україна має потенціал для адаптації таких технологій у річковому й портовому флоті.

Доцільно створити національну програму з підтримки гібридних суден.

### Список використаних джерел

1. DNV – Handbook for Hydrogen-fuelled Vessels (DNV).
2. DNV – Practical guide for approval of ammonia- or hydrogen-fuelled ships (2025).
3. DNV – новини щодо Gas fuelled Hydrogen notation (2024).
4. Lloyd's Register – Appendix LR3 & Rules for ships using gases/low-flashpoint fuels (LR pages, 2023–2025 updates).
5. ABS – Requirements for Hydrogen-Fueled Vessels (ABS / Eagle).
6. IMO – IGF Code (International Code of Safety for Ships Using Gases or Other Low-flashpoint Fuels).
7. EMSA/європейські дослідження про ризики воднево-флоту.
8. Державна служба морського та річкового транспорту України – контакт/регуляторний орган (для національної координації).
9. [https://www.imo.org/en/ourwork/safety/pages/igf-code.aspx?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.imo.org/en/ourwork/safety/pages/igf-code.aspx?utm_source=chatgpt.com) "International Code of Safety for Ship Using Gases or Other ..."
10. [https://www.dnv.com/maritime/publications/handbook-for-hydrogen-fuelled-vessels-download/?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.dnv.com/maritime/publications/handbook-for-hydrogen-fuelled-vessels-download/?utm_source=chatgpt.com) "Handbook for Hydrogen-fuelled Vessels – DNV"
11. [https://www.lr.org/en/knowledge/horizons/june-2023/lr-issues-worlds-first-rules-for-hydrogen-fuel/?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.lr.org/en/knowledge/horizons/june-2023/lr-issues-worlds-first-rules-for-hydrogen-fuel/?utm_source=chatgpt.com) "LR issues world's first rules for hydrogen fuel"
12. [https://ww2.eagle.org/content/dam/eagle/rules-and-guides/current/other/338-requirements-for-hydrogen-fueled-vessels/338-hydrogen-fueled-vessel-reqts-may23.pdf?utm\\_source=chatgpt.com](https://ww2.eagle.org/content/dam/eagle/rules-and-guides/current/other/338-requirements-for-hydrogen-fueled-vessels/338-hydrogen-fueled-vessel-reqts-may23.pdf?utm_source=chatgpt.com) "Requirements for Hydrogen Fueled Vessels"
13. [https://www.emsa.europa.eu/publications/item/5263-mapping-safety-risks-for-hydrogen-fuelled-ships-study-investigating-the-safety-of-hydrogen-as-fuel-on-ships.html?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.emsa.europa.eu/publications/item/5263-mapping-safety-risks-for-hydrogen-fuelled-ships-study-investigating-the-safety-of-hydrogen-as-fuel-on-ships.html?utm_source=chatgpt.com) "Study investigating the safety of hydrogen as fuel on ships"

УДК 681.51:004.89

Грудініна Г. С., к.т.н., Шведов М. В., Мироненко М. В.

Херсонський навчально-науковий інститут

Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв, Україна

## СУЧАСНІ ЕЛЕКТРОПРИВОДИ АВТОНОМНИХ МАЛОРОЗМІРНИХ СУДЕН

**Актуальність.** Використання автономних малорозмірних суден (АМС) суттєво впливає на такі галузі, як оборона, океанографія та комерційне судноплавство значно підвищуючи ефективність виконання складних і небезпечних місій. Швидкий розвиток автономних систем, сенсорних технологій та комунікаційних мереж дозволяє АМС виконувати широкий спектр завдань, від моніторингу навколишнього середовища до спостереження та логістики. Зростаюче впровадження цих систем обумовлено підвищенням рівня автоматизації та застосуванням штучного інтелекту у морській сфері [1, 2].

**Метою роботи є** обґрунтування необхідності розвитку систем керування електроприводами автономних малорозмірних суден. Саме, комбінація інтелектуальної системи управління енергією з електричним двигуном дозволяють розширити можливості застосування електроприводів на автономних малорозмірних судах.

До головних переваг застосування електроприводів можна віднести наступні факти [3, 4]. Низький рівень шуму, за рахунок значного зниження вібрацій. Даний факт особливо важливий під час виконання акустичних місій із застосуванням чутливих датчиків. Підвищення точності керування за рахунок покращення маневрових можливостей автопілота. Простота інтеграції з енергоконтролем та гібридними джерелами (сонце, паливні елементи).

Розглянемо основні компоненти системи електроприводу.

1. Електромотор – зазвичай PMSM / BLDC, індукційні мотори використовуються рідше.
2. Інвертор – важливий для рекуперації, плавного керування і захисту.
3. Механічна передача – або пряма передача, або редуктор.
4. Гвинт, водомет, гвинт у втулці – оптимізується під швидкість або момент.
5. Акумуляторна система + електронна система керування акумуляторною батареєю, яка контролює, захищає та оптимізує роботу батареї. У сучасних електроприводах катерів (рис. 1), швидкісних човнів, автономних

малорозмірних суднах абсолютно домінують мотори з постійними магнітами – безщіткові двигуни постійного струму (BLDC), синхронні двигуни з постійними магнітами (PMSM) [5].



Рисунок 1 – Швидкісний катер на електроприводі від компанії X Shore

З позиції системи керування, перевага надається саме таким двигунам через лінійність і передбачуваність моменту, що дуже важливо при розробці автопілота. Дані двигуни надають можливість точного контролю моменту та швидкості методом, так званого контролю полем (FOC – field-oriented control).

Завдяки відсутності втрат у щітках і високій магнітній щільності запропонований електропривод має високий ККД – 90–96 %.

Сучасні електроприводи для малорозмірних суден мають декілька конструкцій: внутрішній електродвигун – вал – редуктор; електропод (pod, azimuth thrusters), ободний привід (rim-drive), електричні зовнішні підвісні мотори (outboards) і водометні (jet-приводи) (рис. 2). Кожна архітектура має свої сильні сторони з точки зору маневреності, ККД та інтеграції з автопілотом.

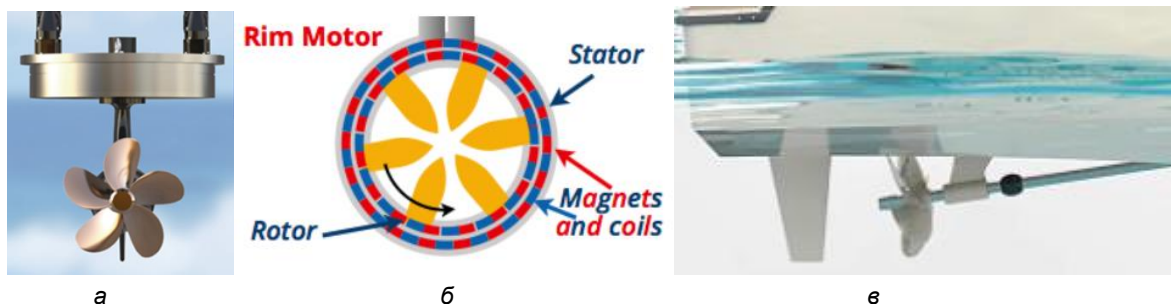


Рисунок 2 – Конструкції сучасних електроприводів малорозмірних суден:  
а – електропод; б – ободний привід; в – внутрішній електродвигун–вал–гвинт

Технології й інновації. Головною перевагою електроподів є можливість обертання на  $360^\circ$  і можливість точного векторного керування тягою [6].

В ободному приводі Rim-drive немає центральної маточини чи карданного валу, натомість лопаті гвинта прикріплені до круглого зовнішнього обода – безпечніший, використовується в малих катерах [7].

Гідрофойли – електропривід – значно підвищують ефективність на швидкості, що дає вищу дальність при тій самій батареї [8].

Інтелектуальні системи керування енергією (EMS) – це інтелектуальні системи, які у поєднанні з електричним двигуном та фотоелектричними панелями, оптимізують розподіл енергії, рекуперацію та планування траєкторії під енергетичні обмеження [3].

Як вже зазначалось раніше, майже лінійна та передбачувана динаміка електроприводу є значною перевагою для системи керування. В даному випадку, треба розуміти, що у сучасному світі інженерії надається перевага попередньому моделюванню роботи розробленого регулятора, а електричний привід легше моделювати. При цьому, судно з електроприводом більш керовано, порівняно з двигуном внутрішнього згорання, і майже не має часової затримки між сигналом керування і виконанням двигуна. Таким чином, можна сказати, що автопілоту легше утримувати судно на заданому курсі під час впливу вітру або хвилювання.

Також, відносно регулятора стабілізації курсу судна критичною є реакція приводу на малу команду зміни тяги. Електродвигун має максимальний момент з нульової швидкості, що дає можливість стабілізувати курс при дуже малій швидкості (0.2–0.5 м/с).

#### Висновки.

Для систем керування автономних катерів електропривод абсолютно домінує, тому що дає:

- миттєвий та точний момент, ідеальний для регуляторів стабілізації курсу та автопілотів;
- спрощений процес тестування, через можливість попереднього моделювання;

- більш точний контроль при низькій швидкості руху (швартування, траєкторний контроль);
- передбачувана динаміка, що підвищує якість розробки і налаштування регуляторів (PID, RISE, SMC, MPC).

#### Список використаних джерел

1. Yang, P.; Xue, J.; Hu, H. A Bibliometric Analysis and Overall Review of the New Technology and Development of Unmanned Surface Vessels. *J. Mar. Sci. Eng.* 2024, 12, 146. [Google Scholar]
2. Gao, K.; Gao, M.; Zhou, M.; Ma, Z. Artificial intelligence algorithms in unmanned surface vessel task assignment and path planning: A survey. *Swarm Evol. Comput.* 2024, 86, 101505. [Google Scholar]
3. Fernandes, J. F. P., Assunção, M., Serrano, D., Afonso, P., Pinheiro, P., Marques, H., Neves, J., Teodoro, P., Póvoa, R., Marat-Mendes, R., & Costa Branco, P. J. (2025). A smart energy management system for surface unmanned vehicles for border surveillance missions. *Scientific Reports*, 15(1), 23684. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-08579-x>
4. Nicolae-Silviu, P. (2021). Review of electric propulsion for small boats/drones. *Scientific Bulletin of Naval Academy*, XXIV(1), 122–129. <https://doi.org/10.21279/1454-864X-21-I1-015>
5. *Azimuth Pod Thruster: An Innovative Equipment in the Field of Ship Propulsion-Electric Outboard\_Rim Thruster\_Electric Pod-FUBER Propulsion.* (n.d.). Retrieved November 25, 2025, from [https://www.fuberpropulsion.com/?Knowledge-of-Electric-Boat-Outboards%2F342.html=&utm\\_source](https://www.fuberpropulsion.com/?Knowledge-of-Electric-Boat-Outboards%2F342.html=&utm_source)
6. *360-rotational marine e-thruster pod promises 70% drag decrease.* (2025, November 12). New Atlas. <https://newatlas.com/marine/helix-pod-cartridge-electric-boat-drive/>
7. Plugboats. *Rim Drive Technology.*(n.d.). Retrieved November 25, 2025, from <https://plugboats.com/dutch-launchng-new-15kw-rim-drive-electric-outboard>
8. Ashworth, B. (n.d.). Candela's C-8 Is a Boat That Flies. *Wired.* Retrieved November 25, 2025, from <https://www.wired.com/story/candela-c-8-polestar-hydrofoil/>

#### УДК 621.3

Новогрецький С. М., к.т.н., Костюченко В. І., к.т.н., Баришник Ю. М.

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв

### ВПЛИВ СТАЛОЇ ЧАСУ ПОДОВЖНЬОЇ ОБМОТКИ ЗБУДЖЕННЯ НА СТАТИЧНУ СТІЙКІСТЬ ПАРАЛЕЛЬНОЇ РОБОТИ СИНХРОННИХ ГЕНЕРАТОРІВ

В автономних та суднових електростанціях важливим питанням є забезпечення максимального ступеня статичної стійкості роботи в будь-яких робочих режимах [1–9]. Вирішення цієї задачі забезпечує найшвидше гасіння малих електро механічних коливань, викликаних зовнішніми малими короткочасними збуреннями. З іншого боку, це дозволяє зменшити обмінні коливання потужності між паралельно працюючими генераторами, які виникають при нерівномірному ході первинного двигуна та за рахунок зон нечутливості окремих елементів системи автоматичного регулювання частоти генераторів [1–3]. Для аналізу статичної стійкості паралельної роботи генераторів однакової потужності доцільно обрати варіаційний метод аналізу рівнянь Парка–Горева [5–8]. При цьому для дослідження взаємних коливань між генераторами достатньо розглянути статичну стійкість лише одного генератора на потужну мережу, що передбачає рівність варіації модуля зображаючого вектора напруги якоря рівним нулеві (змінюється лише кут навантаження або кут вильоту ротора) [8]. І дійсно, якщо розглядати паралельну роботу двох однакових синхронних генераторів на загальне навантаження, система в варіаціях відносно усталеного режиму роботи розділяється на дві незалежні системи: один генератор – половинне навантаження та один генератор – потужна мережа. Перша система розглядає коливання між навантаженням та генератором, друга – коливання між генераторами.

В деяких роботах показано, що в синхронних генераторах подовжньо-поперечного збудження можна досягти більш високого ступеня стійкості за рахунок введення зворотного зв'язку по відхиленню кута вильоту ротора (кута між віссю  $q$  та зображаючим вектором напруги якоря генератора) та частоті обертання генератора [4, 6, 8]. Якщо забезпечити за рахунок закону регулювання збудження в усіх усталених режимах кут вильоту ротора рівним нулеві (скомпенсований синхронний генератор), то такий зворотній зв'язок достатньо ввести лише в поперечній осі збудження [4, 8]. З іншого боку, є очевидним, що демпферна обмотка має сприяти підвищенню статичної стійкості роботи генератора [7], і можна припустити, що для скомпенсованого синхронного генератора саме поперечна демпферна обмотка дозволить максимально забезпечити цей ефект. Але в роботі [10] показано, що

значно підвищити ступінь статичної стійкості у порівнянні із синхронним генератором одноосового збудження можна лише за рахунок введення додаткових зворотних зв'язків по похідним подовжніх проєкцій струмів якоря та індуктора, що еквівалентно зменшенню сталої подовжньої обмотки збудження та часу електромагнітних перехідних процесів.

**Мета роботи** – провести аналіз впливу сталої часу подовжньої обмотки збудження та демпферних обмоток на статичну стійкість паралельно працюючих синхронних генераторів при регулюванні збудження по відхиленню кута вильоту ротора.

#### Теоретичне обґрунтування досліджень та результати роботи

За основу візьмемо математичний опис паралельної роботи ідентичних синхронних генераторів на загальне навантаження, представлений в роботі [10], але введемо можливість варіювати сталою часу подовжньої обмотки збудження та додатково розглянемо статичну стійкість роботи генератора на навантаження.

Надалі використовуємо наступні позначення:  $I_x$  – струми відповідних обмоток генератора, що визначаються за допомогою відповідних індексів ( $d$  – статорна обмотка по подовжній осі,  $q$  – статорна обмотка по поперечній осі,  $fd$  – обмотка збудження по подовжній осі,  $fq$  – обмотка збудження по поперечній осі,  $rd$  – заспокійлива обмотка по подовжній осі,  $rq$  – заспокійлива обмотка по поперечній осі);  $U_x$  – напруги на відповідних обмотках;  $T_{d0}$ ,  $T_{q0}$  – сталі часу ланцюга збудження по подовжній і поперечній осях відповідно при розімкненому ланцюзі статора;  $T_{1d}$ ,  $T_{1q}$  – сталі часу заспокійливих контурів по подовжній і поперечній осі;  $r_a$  – активний опір обмотки статора;  $\omega$  – кутова швидкість ротора синхронної машини;  $x_d$ ,  $x_q$  – синхронні реактивні опори по подовжній і поперечній осі;  $x_{ad}$ ,  $x_{aq}$  – реактивні опори реакції якоря по подовжній і поперечній осі;  $k_{sx}$  – коефіцієнт, що враховує розсіювання потоку відповідної обмотки.

Усереднені значення параметрів неявнополюсинхронних генераторів, що використовувались при моделюванні:  $r_a = 0,02$  в.о.;  $x_s = 0,1$  в.о.;  $x_d = x_q = 2$  в.о.;  $x'_d = 0,2$  в.о.;  $x'_q = 0,2$  в.о. при наявності обмотки збудження по поперечній осі та  $x'_q = 2$  в.о. при відсутності обмотки збудження по поперечній осі;  $x''_d = x''_q = 0,15$  в.о.;  $T_{d0} = 750$  рад.;  $T_{q0} = 375$  рад.;  $T''_d = 7$  рад. Для прийнятих усереднених параметрів справедливі наступні коефіцієнти розсіювання потоків та сталі часу демпферних обмоток:

- для генератора одноосового збудження:

$$k_{fsd} = 0.947; k_{rsd} = 0.95; k_{rsq} = 0.974; T_{1d} = 93.3 \text{ рад.}; T_{1d} = 91.1 \text{ рад.};$$

- для генератора подовжньо-поперечного збудження:

$$k_{fsd} = 0.947; k_{fsq} = 0.947; k_{rsd} = 0.95; k_{rsq} = 0.95; T_{1d} = 93.3 \text{ рад.}; T_{1d} = 93.3 \text{ рад.};$$

Рівняння механічного руху генераторного агрегату має наступний вигляд:

$$T_{jr} \frac{d}{dt} \omega = M_{\text{мех}}(\omega) - M_{\text{ем}} = M_{\text{мех}}(\omega) - ((-x_d i_d + i_{fd} + i_{rd}) i_q + (x_q i_q - i_{fq} + i_{rq}) i_d), \quad (2)$$

де  $T_{jr}$  – інерційна стала генераторного агрегату (для подальшого аналізу прийmemo  $T_{jr} = 1000$  рад.);

$M_{\text{ем}}$  – електромагнітний момент генератора;

$M_{\text{мех}}$  – механічний момент привідного двигуна, який у випадку ідеального регулятора прямої дії можна представити формулою, записаною у відносних одиницях:

$$M_m = k_{\omega} (1 - \omega), \quad (3)$$

тут  $k_{\omega}$  – коефіцієнт пропорційності, який визначає статизм регульовальної характеристики автоматичного регулятора частоти (для подальшого аналізу прийmemo  $k_{\omega} = 25$  в.о., що буде відповідати статизму регульовальної характеристики 4 %).

Для спрощення оберемо наступні закони регулювання

- для генератора одноосового збудження

$$U_f = U_{fx} + k_u (U_3 - U) + k_{\Theta} \Theta + k_{\Theta 1} \frac{d\Theta}{dt} + k_{\Theta 2} \frac{d\omega}{dt}; \quad (4)$$

- для генератора подовжньо-поперечного збудження

$$\left. \begin{aligned} U_{fd} &= U_{fd0} + k_u (U_3 - U); \\ U_{fq} &= U_{fq0} + k_{\Theta} \Theta + k_{\Theta 1} \frac{d\Theta}{dt} + k_{\Theta 2} \frac{d^2\Theta}{dt^2}, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

де  $\Theta$  – кут вильоту ротора генератора (кут між віссю  $q$  та зображаючим вектором напруги якоря генератора);

$U_3$  та  $U_{fx}$  – задана напруга якоря та напруга холостого ходу генератора;

$k_u, k_\Theta, k_{\Theta 1}, k_{\Theta 2}$  – коефіцієнти підсилення по відхиленню напруги якоря, по відхиленню, першій та другій похідним кута вильоту ротора;

$U_{fd0}$  та  $U_{fq0}$  – напруги збудження, що забезпечують в усталеному режимі кут вильоту ротора рівним нулеві ( $\Theta = 0$ ).

Кут вильоту ротора пов'язаний із проєкціями зображаючого вектора напруги якоря та із частотою обертання ротора наступними рівняннями:

$$U_d = U \sin(\Theta); \quad U_q = U \cos(\Theta); \quad \partial\Theta/\partial t = (\omega_r - 1). \quad (6)$$

Розглянемо режим роботи на потужну мережу ( $\delta U = 0$ ) неявнополюсного генератора ( $x_d = x_q = x_a$ ) при номінальному навантаженні. Лінеаризовані рівняння в операторній формі (параметри усталеного режиму, в якому проводиться аналіз статичної стійкості, будемо позначати додатково буквою „н” в індексі):

- для генератора одноосового збудження

$$A_{p01}(p) \cdot \delta F_{p01} = 0;$$

$$A_{p01}(p) = \begin{bmatrix} -(p x_d + r_a) & \omega_n x_q & p & p & \omega_n & x_a I_{qn} & -U_n \cos \Theta_n \\ \omega_n x_d & (p x_q + r_a) & -\omega_n & -\omega_n & p & -(I_{fdn} - x_d I_{dn}) & -U_n \sin \Theta_n \\ -T_{d0} k_{fsd} x_{ad} p & 0 & (T_{d0} p + 1) & T_{d0} k_{fsd} p & 0 & -k_{\Theta 2} p & -k_{\Theta} - k_{\Theta 1} p \\ -T_{1d} k_{rsd} x_{ad} p & 0 & T_{1d} k_{rsd} p & (T_{1d} p + 1) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & T_{1q} k_{rsq} x_{aq} p & 0 & 0 & (T_{1q} p + 1) & 0 & 0 \\ 0 & I_{fdn} & I_{qn} & I_{qn} & I_{dn} & (T_j p + k_\omega) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -p \end{bmatrix}$$

$$\delta F_{p01} = \text{colon}(\delta i_d, \delta i_q, \delta i_{fd}, \delta i_{rd}, \delta i_{rq}, \delta \omega, \delta \Theta)$$

- для генератора подовжньо-поперечного збудження в компенсованому режимі ( $\Theta_n = 0$ )

$$A_{ps1}(p) \cdot \delta F_{ps1} = 0;$$

$$A_{ps1}(p) = \begin{bmatrix} -(p x_d + r_a) & \omega_n x_q & p & -\omega_n \\ \omega_n x_d & (p x_q + r_a) & -\omega_n & -p \\ -T_{d0} k_{fsd} x_{ad} p & 0 & (T_{d0} p + 1) & 0 \\ 0 & -T_{q0} k_{fsq} x_{aq} p & 0 & (T_{q0} p + 1) \\ -T_{1d} k_{rsd} x_{ad} p & 0 & T_{1d} k_{rsd} p & 0 \\ 0 & T_{1q} k_{rsq} x_{aq} p & 0 & -T_{1q} k_{rsq} p \\ -I_{fqh} & I_{fdh} & I_{qh} & -I_{dh} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \dots$$

$$\dots \begin{bmatrix} p & \omega_n & (x_a I_{qn} - I_{fqh}) & -U_n \\ -\omega_n & p & -(I_{fdh} - x_d I_{dh}) & 0 \\ T_{d0} k_{fsd} p & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -T_{q0} k_{fsq} p & -k_{\Theta 2} p & -k_{\Theta} - k_{\Theta 1} p \\ (T_{1d} p + 1) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & (T_{1q} p + 1) & 0 & 0 \\ I_{qh} & I_{dh} & (T_j p + k_\omega) & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -p \end{bmatrix};$$

$$\delta F_{ps1} = \text{colon}(\delta i_d, \delta i_q, \delta i_{fd}, \delta i_{fq}, \delta i_{rd}, \delta i_{rq}, \delta \omega, \delta \Theta).$$

Прибираючи рядок, що описує процеси у відповідній демпферній обмотці, та стовпець, що відповідає варіації струму в цій обмотці, ми отримусмо матриці стану системи без урахування тієї чи іншої демпферної обмотки. Розглянемо наступні варіанти:

- 1) синхронний генератор одноосьового збудження без врахування демпферних обмоток;
- 2) синхронний генератор одноосьового збудження з врахуванням демпферних обмоток;
- 3) синхронний генератор подовжньо-поперечного збудження без врахування поперечної демпферної обмотки;
- 4) синхронний генератор подовжньо-поперечного збудження з врахуванням поперечної демпферної обмотки;
- 5) синхронний генератор подовжньо-поперечного збудження з врахуванням поперечної та продольної демпферних обмоток.

Як розрахунковий усталений режим обираємо номінальний, тоді параметри режиму у відносних одиницях;

– для генератора одноосьового збудження:

струм якоря  $I_H = 1$  в.о.; напруга якоря  $U_H = 1$  в.о.; коефіцієнт потужності  $\cos\varphi_H = 0,8$ ;  $\varphi_H = 36,87^\circ$ ;

струм обмотки збудження  $I_{fdH} = E_{fdH} = \sqrt{(U_H + I_H r_a \cos\varphi_H + I_H x_d \sin\varphi_H)^2 + (I_H r_a \sin\varphi_H - I_H x_d \cos\varphi_H)^2} = 2,73$  в.о.;

кут вильоту ротора  $\Theta_H = \arccos((U_H + I_H r_a \cos\varphi_H + I_H x_d \sin\varphi_H)/E_{fdH}) = 35,63^\circ$ ;

проекція струму якоря на подовжню вісь  $I_{dH} = I_H \sin(\Theta_H + \varphi_H) = 0,954$  в.о.;

проекція струму якоря на поперечну вісь  $I_{qH} = I_H \cos(\Theta_H + \varphi_H) = 0,301$  в.о.;

частота обертання привідного двигуна  $\omega_H = 1$  в.о.;

– для генератора подовжньо-поперечного збудження в скомпенсованому режимі ( $\Theta_H = 0$ ):

струм якоря  $I_H = 1$  в.о.; напруга якоря  $U_H = 1$  в.о.; коефіцієнт потужності  $\cos\varphi_H = 0,8$ ;  $\varphi_H = 36,87^\circ$ ;

проекція струму якоря на подовжню вісь  $I_{dH} = I_H \sin(\Theta_H + \varphi_H) = 0,6$  в.о.;

проекція струму якоря на поперечну вісь  $I_{qH} = I_H \cos(\Theta_H + \varphi_H) = 0,8$  в.о.;

струм обмотки збудження по подовжній осі  $I_{fdH} = E_{fdH} = U_H + I_{dH} x_d + I_{qH} r_a = 2,22$  в.о.;

струм обмотки збудження по подовжній осі  $I_{fqH} = E_{fqH} = I_{qH} x_q - I_{dH} r_a = 1,59$  в.о.;

частота обертання привідного двигуна  $\omega_H = 1$  в.о.;

За допомогою програмного середовища MathCAD складена програма для визначення коефіцієнтів характеристичних рівнянь відповідних систем в залежності від коефіцієнтів зворотного зв'язку  $k_\Theta$ ,  $k_{\Theta 1}$ ,  $k_{\Theta 2}$  та сталої часу подовжньої обмотки збудження, розрахунку коренів характеристичного рівняння та визначення степені статичної стійкості  $\eta$  як найбільшої дійсної частини цих коренів. Варіюючи коефіцієнтами  $k_\Theta$  (від 0 до 30 в.о.),  $k_{\Theta 1}$  (від 0 до 600 в.о.),  $k_{\Theta 2}$  (від 0 до 10 000 в.о.) та сталою часу  $T_{d0}$ , встановлено, що при значеннях  $T_{d0} < 112,5$  рад статична стійкість змінюється несуттєво, тому були визначені умови максимуму ступеня статичної стійкості при  $T_{d0} = 112,5$  рад:

варіант 1: при  $k_\Theta = 28$  в.о.,  $k_{\Theta 1} = 600$  в.о.,  $k_{\Theta 2} = 1\,800$  в.о. маємо  $\eta = -0,054$  рад<sup>-1</sup>;

варіант 2: при  $k_\Theta = 28$  в.о.,  $k_{\Theta 1} = 540$  в.о.,  $k_{\Theta 2} = 4\,600$  в.о. маємо  $\eta = -0,088$  рад<sup>-1</sup>;

варіант 3: при  $k_\Theta = 19$  в.о.,  $k_{\Theta 1} = 450$  в.о.,  $k_{\Theta 2} = 10\,000$  в.о. маємо  $\eta = -0,068$  рад<sup>-1</sup>;

варіант 4: при  $k_\Theta = 30$  в.о.,  $k_{\Theta 1} = 540$  в.о.,  $k_{\Theta 2} = 8\,400$  в.о. маємо  $\eta = -0,067$  рад<sup>-1</sup>;

варіант 5: при  $k_\Theta = 30$  в.о.,  $k_{\Theta 1} = 480$  в.о.,  $k_{\Theta 2} = 8\,200$  в.о. маємо  $\eta = -0,067$  рад<sup>-1</sup>.

Можна констатувати, що знов отриманий від'ємний результат. Статична стійкість тим більша, чим більш від'ємним є ступінь статичної стійкості. Таким чином, найбільшій стійкості паралельної роботи на потужну мережу можна досягти при одноосьовому збудженні та наявності демпферних обмоток.

Розглянемо статичну стійкість одиночної роботи синхронного генератора на активно-індуктивне навантаження.

Лінеаризовані рівняння в операторній формі:

– для генератора одноосового збудження:

$$A_{rl1}(p) \cdot \delta F_{rl1} = 0;$$

$$A_{rl1}(p) = \begin{bmatrix} -(p x_d + r_a) & \omega_H x_q & p & p & \omega_H & -\sin \Theta_H & x_a I_{qH} & -U_H \cos \Theta_H \\ \omega_H x_d & (p x_q + r_a) & -\omega_H & -\omega_H & p & \cos \Theta_H & -(I_{fdH} - x_d I_{dH}) & -U_H \sin \Theta_H \\ -T_{d0} k_{fsd} x_{ad} p & 0 & (T_{d0} p + 1) & T_{d0} k_{fsd} p & 0 & k_u & -k_{\Theta 2} p & -k_{\Theta} - k_{\Theta 1} p \\ -T_{1d} k_{rsd} x_{ad} p & 0 & T_{1d} k_{rsd} p & (T_{1d} p + 1) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & T_{1q} k_{rsq} x_{aq} p & 0 & 0 & (T_{1q} p + 1) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & I_{fdH} & I_{qH} & I_{qH} & I_{dH} & 0 & (T_j p + k_w) & 0 \\ (p x_z + r_z) & -\omega_H x_q & 0 & 0 & 0 & -\sin \Theta_H & -x_z I_{qH} & -U_H \cos \Theta_H \\ -\omega_H x_q & -(p x_z + r_z) & 0 & 0 & 0 & \cos \Theta_H & -x_z I_{dH} & -U_H \sin \Theta_H \end{bmatrix};$$

$$\delta F_{rl1} = \text{colon}(\delta i_d, \delta i_q, \delta i_{fd}, \delta i_{rd}, \delta i_{rq}, \delta U, \delta \omega, \delta \Theta);$$

– для генератора подовжньо-поперечного збудження в скомпенсованому режимі ( $\Theta_H = 0$ ):

$$A_{rl2}(p) \cdot \delta F_{rl2} = 0;$$

$$A_{rl2}(p) = \begin{bmatrix} -(p x_d + r_a) & \omega_H x_q & p & -\omega_H \\ \omega_H x_d & (p x_q + r_a) & -\omega_H & -p \\ -T_{d0} k_{fsd} x_{ad} p & 0 & (T_{d0} p + 1) & 0 \\ 0 & -T_{q0} k_{fsq} x_{aq} p & 0 & (T_{q0} p + 1) \\ -T_{1d} k_{rsd} x_{ad} p & 0 & T_{1d} k_{rsd} p & 0 \\ 0 & T_{1q} k_{rsq} x_{aq} p & 0 & -T_{1q} k_{rsq} p \\ -I_{fqH} & I_{fdH} & I_{qH} & -I_{dH} \\ (p x_z + r_z) & -\omega_H x_z & 0 & 0 \\ -\omega_H x_z & -(p x_z + r_z) & 0 & 0 \\ p & \omega_H & 0 & (x_a I_{qH} - I_{fqH}) \\ -\omega_H & p & 1 & -(I_{fdH} - x_d I_{dH}) \\ T_{d0} k_{fsd} p & 0 & k_u & 0 \\ 0 & -T_{q0} k_{fsq} p & 0 & -k_{\Theta 2} p \\ \dots (T_{1d} p + 1) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & (T_{1q} p + 1) & 0 & 0 \\ I_{qH} & I_{dH} & 0 & (T_j p + k_w) \\ 0 & 0 & 0 & -x_z I_{qH} \\ 0 & 0 & 1 & -x_z I_{dH} \end{bmatrix};$$

$$\delta F_{rl2} = \text{colon}(\delta i_d, \delta i_q, \delta i_{fd}, \delta i_{fq}, \delta i_{rd}, \delta i_{rq}, \delta U, \delta \omega, \delta \Theta).$$

Розрахунок статичної стійкості для вже визначених коефіцієнтів зворотного зв'язку та сталої часу дозволив отримати наступні результати (опір навантаження у відносних одиницях  $x_z = 0,6$  в.о. та  $r_z = 0,8$  в.о.; коефіцієнт зворотного зв'язку по напрузі  $k_u = 20$  в.о.):

варіант 1: система нестійка;

варіант 2: система нестійка;

варіант 3:  $\eta = -0,019$  рад<sup>-1</sup>;

варіант 4:  $\eta = -0,021$  рад<sup>-1</sup>;

варіант 5:  $\eta = -0,021$  рад<sup>-1</sup>.

Таким чином, генератор одноосового збудження не може забезпечити паралельну роботу на активно-індуктивне навантаження зі зворотними зв'язками, визначеними із умов максимального демпфування взаємних коливань генераторних агрегатів. З іншого боку, синхронний генератор подовжньо-поперечного збудження при заданому законі регулювання зберігає статичну стійкість із достатньо високим ступенем.

**Висновки.** 1. Наявність поперечної демпферної обмотки дозволяє зменшити величину зворотного зв'язку по похідній частоти обертання, необхідну для забезпечення максимального демпфування взаємних коливань між паралельно працюючими генераторами, але суттєво не впливає на рівень стійкості при регулюванні збудження по похідним частоти та кута вильоту ротора. 2. Синхронний генератор одноосового збудження дозволяє досягти вищих показників стійкості при роботі на потужну мережу, але отримані при цьому коефіцієнти зворотного зв'язку не забезпечують стійку роботу на активно-індуктивне навантаження. 3. Зменшення сталої часу подовжньої обмотки збудження в генераторах подовжньо-поперечного збудження дозволяє підвищити рівень демпфування взаємних коливань між генераторами та зберегти високий рівень статичної стійкості при роботі на активно-індуктивне навантаження.

#### Список використаних джерел

1. Савенко О. Є. Дослідження суднової електроенергетичної системи порома «Єйськ» / О. Є. Савенко // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2013. – № 1. – С. 85–89.
2. Савенко О. Є. Оптимізація роботи суднової електростанції з метою підвищення якості електроенергії / О. Є. Савенко // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2013. – № 6. – С. 74–78.
3. Новогрецький С. Н. Особенности анализа статической устойчивости электроэнергетических систем / С. Н. Новогрецький // Вісник НУК (електрон. вид.). – Миколаїв: НУК, 2010. – № 2.
4. Новогрецький С. Н. Влияние неравномерности хода первичных двигателей на колебания режимных параметров параллельно работающих скомпенсированных синхронных генераторов / С. Н. Новогрецький // Вісник Кременчуцького державного політехнічного ун-ту ім. М. Остроградського. – Кременчук : КДПУ, 2009. – Вип. 3/2009(56), ч. 1. – С. 27–30.
5. Новогрецький С. Н. Регулирование напряжения возбуждения в скомпенсированном синхронном генераторе / С. Н. Новогрецький // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – Кременчук : КДПУ, 2004. – Вип. 2/2004 (25). – С. 71–73.
6. Zhou K., Guo H., & Sun L. Output feedback dynamic tracking excitation control of synchronous generators // IET Generation, Transmission & Distribution. – 2017. – Vol. 11, No. 7. – P. 1812–1820. – DOI: 10.1049/iet-gtd.2016.0133
7. Chakraborty P., & Prakash R. Modeling and Simulation of a Synchronous Generator with Rotor Angle Stability and Solve Inter Area Mode of Oscillation in Power System using Power System Stabilizer (PSS) // AIUB Journal of Science and Engineering. – 2021. – Vol. 20, No. 2. – Режим доступу: <https://ajse.aiub.edu/index.php/ajse/article/view/20>
8. Uzochukwu O. Designing optimal power system stabilizer for synchronous generator with and without damper windings // Academia.edu. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.academia.edu/97925269>
9. Новогрецький С. М. Статическая устойчивость работы синхронных генераторов автономно и на сеть бесконечной мощности / С. М. Новогрецький // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – Кременчук: КДПУ, 2007. – Вип. 3/2007 (44), ч. 2. – С. 114–117.
10. Новогрецький С. М. Вплив демпферної обмотки на статичну стійкість паралельної роботи синхронних генераторів / С. М. Новогрецький, Ю. М. Баришнік // Сучасні проблеми автоматики та електротехніки: матеріали всеукраїнської науково-технічної конференції. – Миколаїв: НУК, 2025. – С. 43–47.

УДК 681.51:004.89

Грудініна Г. С., к.т.н., Радченко О. В.

Херсонський навчально-науковий інститут

Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв, Україна

## ЕЛЕКТРОПРИВОД У РОБОТИЗОВАНИХ МОРСЬКИХ ОБ'ЄКТАХ

**Актуальність.** Електропривод займає ключове місце в розвитку сучасних роботизованих морських об'єктів, особливо підводних апаратів, де надійність, енергоефективність і автономність визначають успіх місії. Підводне середовище висуває унікальні вимоги – високий тиск, агресивність морської води, складність обслуговування та

необхідність тривалої безвідмовної роботи. Саме тому електроприводи, які забезпечують точне керування, низький рівень шуму, компактність і герметичність, стали основним типом приводів у AUV, ROV та інших підводних роботах (табл. 1). Швидкий розвиток океанографії, оборонних систем, офшорної індустрії й екологічного моніторингу значно підвищує потребу у високоефективних електроприводах, що робить тему їх дослідження та вдосконалення особливо актуальною.

**Метою роботи є** обґрунтування необхідності розвитку систем керування електроприводом морських рухомих об'єктів. Підводні апарати найбільше залежать від електроприводу, оскільки працюють в умовах, де використання інших типів силових установок майже неможливе або небезпечне [1]. На відміну від надводних систем, вони не мають доступу до повітря для роботи двигунів внутрішнього згоряння, а гідравлічні чи пневматичні системи ускладнюють конструкцію, збільшують ризик витоків і потребують високого тиску та додаткових джерел енергії. Електропривод забезпечує підводним роботам тиху роботу, що важливо для наукових і військових місій, компактність, ефективне використання обмеженого енергоресурсу та надійність у тривалому автономному режимі. Крім того, сучасні електродвигуни легко герметизуються, дозволяють тонке керування та добре інтегруються із системами навігації й автопілотом, тому є оптимальним і практично безальтернативним рішенням для AUV і ROV.

Таблиця 1 – Класифікація роботизованих морських об'єктів

| Тип роботизованого апарата          | Область застосування         | Коротка характеристика                                                                            |
|-------------------------------------|------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| AUV (Autonomous Underwater Vehicle) | Підводний                    | Автономні апарати, що виконують місії без кабелю та без участі оператора.                         |
| ROV (Remotely Operated Vehicle)     | Підводний                    | Керовані оператором через трос-кабель, застосовуються для огляду, ремонту, маніпуляцій.           |
| Gliders                             | Підводний                    | Енергоефективні апарати, що рухаються за рахунок зміни плавучості, призначені для тривалих місій. |
| Hybrid AUV/ROV                      | Підводний                    | Поєднують автономний режим і можливість керування по кабелю.                                      |
| USV (Unmanned Surface Vehicle)      | Надводний                    | Безпілотні надводні човни для розвідки, моніторингу, транспортування.                             |
| ASV (Autonomous Surface Vehicle)    | Надводний/<br>приповерхневий | Автономні надводні платформи з автопілотом для тривалих місій без оператора.                      |

У підводних роботах найпоширеніші безколекторні електродвигуни типів BLDC та PMAС, оскільки вони забезпечують високий ККД, плавне керування та компактність. Для роботи під великим тиском двигуни часто розміщують у маслonaповнених або компенсованих корпусах, що захищає їх від проникнення води та корозії. Таке конструктивне рішення дозволяє зберігати надійність на значних глибинах і забезпечує стабільну роботу протягом тривалих автономних місій [2].

Передача механічної потужності в підводних апаратах виконується через герметичні редуктори, які витримують високий тиск і мінімізують втрати енергії. Магнітні муфти дозволяють передавати крутий момент без фізичного контакту валів, усуваючи ризик протікання через сальники. У сучасних конструкціях поширюється прямий (direct drive) привод – двигун безпосередньо з'єднаний із рушієм або механізмом, що зменшує кількість рухомих частин і підвищує надійність.

Окрім рушіїв (табл. 2.) підводні роботи використовують численні електроприводи для маніпуляторів, стабілізаторів, висувних штанг, камер та інших інструментів. Такі виконавчі механізми мають бути компактними, герметичними та стійкими до високого зовнішнього тиску. Вони забезпечують точні рухи та силову взаємодію з об'єктами під водою, що є критичним для задач огляду, підводного ремонту, відбору проб і високоточних наукових операцій [3, 4].

Керування електроприводами в підводних апаратах здійснюється спеціалізованими контролерами: ПЛК, мікроконтролерами (MCU) та цифровими сигнальними процесорами (DSP). Вони забезпечують обробку сигналів у реальному часі, стабільну роботу алгоритмів регулювання та взаємодію з навігаційними й бортовими системами. Основою більшості систем керування є PID-регулятори, які забезпечують стабільну та передбачувану реакцію. Для складних умов застосовують адаптивні та робастні регулятори, здатні компенсувати зміни навантаження і впливи середовища. Моделі прогнозного керування (MPC) використовують математичні моделі для оптимізації руху в реальному часі [5].

Таблиця 2 – Приводи гребних гвинтів та рушіїв

| Тип рушія / приводу              | Коротка характеристика                                                                | Переваги                                                                           |
|----------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| Класичні гвинтові рушії          | Стандартні осьові гвинти, що створюють тягу завдяки обертанню лопатей.                | Простота, висока ефективність, доступність.                                        |
| Керовані/азимутальні (thrusters) | Рушії з можливістю змінювати напрям тяги за рахунок повороту корпусу.                 | Маневреність, точне позиціонування, ідеальні для ROV.                              |
| Ободні приводи (rim-drive)       | Гвинт обертається без центрального вала, мотор інтегрований у кільце навколо лопатей. | Безконтактність, тиха робота, висока надійність, менше зношування.                 |
| Водометні рушії (jet-thrusters)  | Створюють тягу шляхом виштовхування струменя води через сопло.                        | Безпечні при роботі біля об'єктів, хороші для малих корпусів та турбулентних умов. |

Для точного керування приводами використовують комплекс датчиків, які контролюють положення валів, споживаний струм, швидкість обертання та тиск усередині герметичних відсіків. Ці дані дозволяють системі визначати стан приводу та виконувати корекцію команд у режимі реального часу [6].

Системи захисту запобігають аваріям і пошкодженням: обмежують струм при перевантаженні, відключають привід при короткому замиканні або витоку. Особливо важливим є контроль герметичності та виявлення вологи всередині модулів, адже проникнення води може привести до негайної відмови.

Джерела живлення визначають тривалість роботи та динамічні можливості підводних роботів, тому вибір акумуляторної системи безпосередньо впливає на потужність і режим роботи електроприводів. Найпоширенішими є літєві батареї (Li-ion, LiPo, LiFePO<sub>4</sub>), які забезпечують високу енергоемність і стабільну напругу для рушіїв та виконавчих механізмів. У складніших апаратах застосовують паливні елементи та гібридні системи, що дозволяє суттєво збільшити автономність. Ефективне керування енергоспоживанням приводів – критично важливе, адже кожна зайва витрата зменшує тривалість місії. У деяких пристроях, наприклад глайдерах, використовуються методи часткової рекуперації енергії, що додатково підвищує ефективність роботи системи.

**Висновки.** Електроприводи є ключовою технологією для підводних роботизованих апаратів, оскільки забезпечують надійність, енергоефективність і точність керування в умовах обмежених ресурсів та високого зовнішнього тиску. Використання сучасних електродвигунів, надійних систем передачі руху й інтелектуальних алгоритмів керування дозволяє AUV і ROV виконувати складні місії з високою автономністю. Подальший розвиток електроприводів спрямований на підвищення їх ефективності, зменшення маси, покращення герметизації та інтеграцію з цифровими системами діагностики, що відкриває нові можливості для роботизованих морських технологій.

#### Список використаних джерел

1. Yuh J., Marani G., Blidberg D.R. *Underwater Robotics: History, Principles, and Applications*. Springer Handbook of Robotics, 2016.
2. Antonelli G. *Underwater Robots: Motion and Force Control of Vehicle-Manipulator Systems*. Springer, 2018.
3. Kim J., Kim K., Choi H. *Design and Control of Underwater Thrusters for Autonomous Underwater Vehicles*. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2020.
4. Blue Robotics Technical Documentation. *Thruster Design, Waterproof Motors and Underwater Actuation Systems*. Blue Robotics, 2023.
5. Fossen T. I. *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*. Wiley, 2021.
6. Ridao P., Carreras M., Ribas D., Sanz P.J. *Underwater Robotics Research Challenges: AUVs and ROVs*. Annual Reviews in Control, 2020.

### СЕКЦІЯ 3. ПЕРЕТВОРЮВАЛЬНА ТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ. АВТОМАТИКА, ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ І ПРИСТРОЇ

УДК 621.3

Рябенський В. М., д.т.н., Варганов М. О.

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв

#### ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ГІРАТОРІВ

Масове використання пристроїв енергетичної електроніки в судновій електроенергетиці привело до значного погіршення якості електроенергії, суттєвого погіршення електромагнітної сумісності, що, в свій час, привело до проведення ряду досліджень по насиченню електроенергетики як активними, так і пасивними фільтрами компенсуючими пристроями. Значне місце серед них займають резонансні фільтри, налаштовані на гармоніки, що знаходяться в діапазоні частот до 1000 Гц. Все це приводить до значного ускладнення електротехнічного обладнання, до зростання його масо-габаритних показників, а також до зростання затрат на його налагодження. Найбільші проблеми створюють дроселі резонансних кіл, що мають значну вагу, габарити, значний розкид параметрів. У цьому плані корисно звернутись до віртуальних дроселів, які можна створити завдяки технології перетворення опорів колами зворотного зв'язку підсилювачів – конверторами від'ємного опору, гіраторами [1], які дають можливість імітувати властивості котушок індуктивності, використовуючи при цьому лише операційні підсилювачі, конденсатори та резистори. Електронні аналоги індуктивності від'ємного опору знаходять використання в пристроях [2, 3], в яких необхідно мінімізувати масогабаритні показники електронних виробів з одночасною можливістю зміни параметрів реактивних елементів у широких межах.

На рис. 1 наведена одна з найбільш розповсюджених схем гіратора, для якої величина еквівалентної індуктивності розраховується по формулі:

$$L = R_1 \cdot R_2 \cdot C; \quad (1)$$

добротності:

$$Q = \sqrt{R_1/R_2}/2. \quad (2)$$

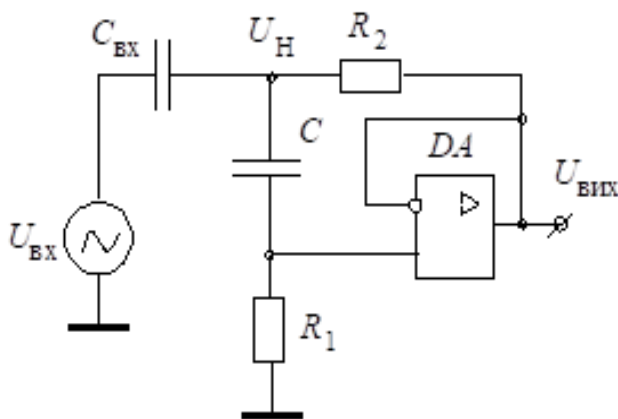


Рисунок 1

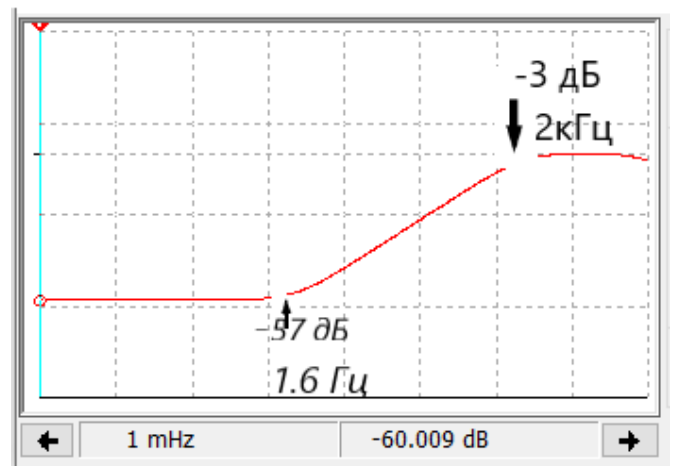


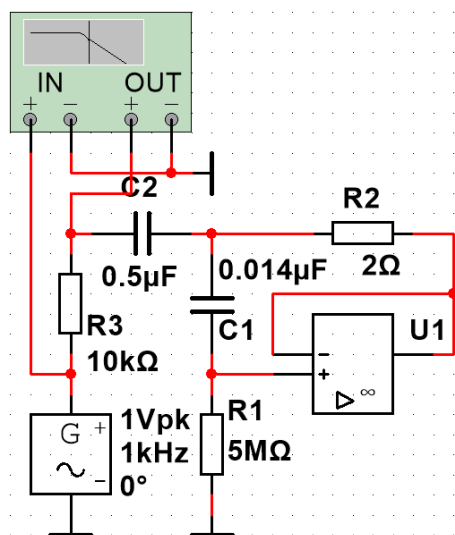
Рисунок 2

З (1), (2) витікає необхідна умова забезпечення якісного перетворення:

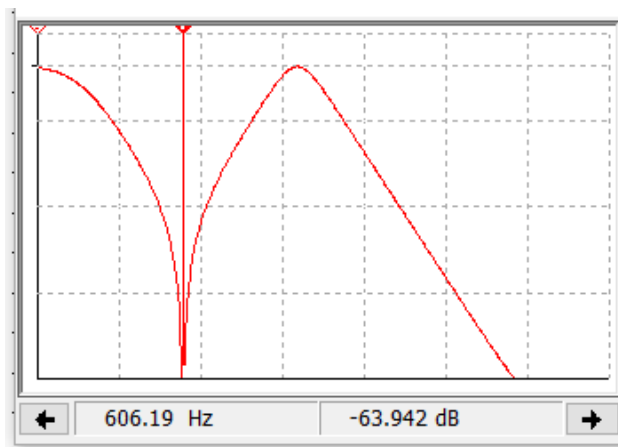
$Q \gg 1$ , або  $R_1 \gg R_2$ . При заміні конденсатора  $C_{BX}$  на резистор величиною 10 кОм, виборі конденсатора  $C = 0.014$  мкФ, резистора  $R_1 = 5$  мОм і резистора  $R_2 = 10$  Ом отримаємо диференціюючу ланку, амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) якої наведена на рис. 2. З вигляду АЧХ витікає, що схема виконує функцію індуктивності в частотному діапазоні від 1.6 Гц до 2 кГц. Розрахункове значення індуктивності складає 0.7 Гн,

а значення, що обчислюється по частоті зрізу, має величину приблизно 0.2 Гн. Така велика різниця обумовлена низькою точністю вимірювань, але в обох випадках маємо досить значну величину індуктивності. Віртуальний підсилювач має коефіцієнт підсилення в низькочастотному діапазоні до частоти зрізу +100 дБ. Частота зрізу – 800 Гц. Аналогічні частотні характеристики отримані і при використанні операційних підсилювачів TL321IP, TLC1079IN та ряду інших. Останній ОП відноситься до категорії потужних, що підтверджує можливість використання таких схем у пристроях енергетичної електроніки.

Більш детальне визначення величини індуктивності проведемо на прикладі резонансних схем, що наведені на рис. 3, а, б. Частотні характеристики їх наведені відповідно на рис. 4, а, б.

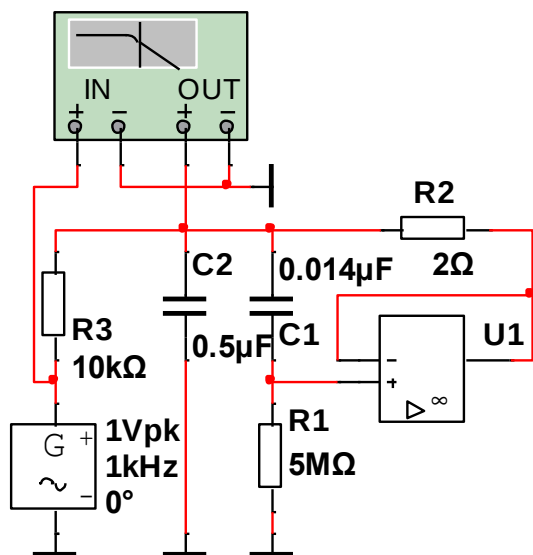


а

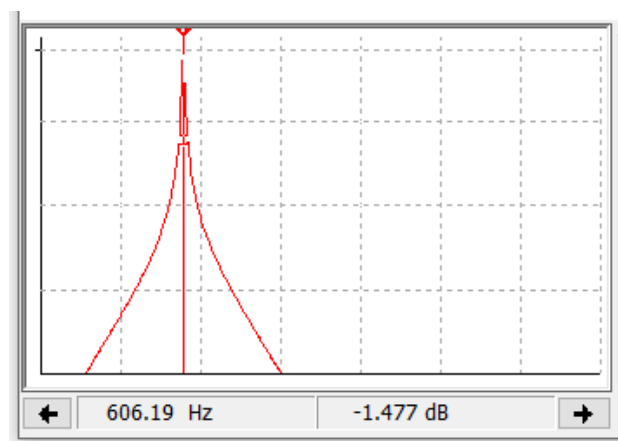


б

Рисунок 3



а



б

Рисунок 4

В обох випадках резонансна частота має значення 606 Гц. Звідси знаходиться величина індуктивності:

$$L = \left( \frac{1}{2\pi f} \right)^2 \frac{1}{C},$$

яка досягає величини більшої, ніж 12 Гн.

Для регулювання величини індуктивності в незначних межах можна використати опори  $R_1$  або  $R_2$ .

Використання гіраторів як низькочастотних фільтрів можливе при їх послідовному з'єднанні. На рис. 5 наведена амплітудно-частотна характеристика двох полосових фільтрів, зміщених по частоті, з якої витікає можливість будувати фільтри з складними типами амплітудно-частотних характеристик.

Якщо конденсатор С1 замінити на індуктивність, то гіратор буде виконувати функцію конденсатора і тоді схема полосового фільтра буде мати вигляд, що відповідає рис. 6, а. Його амплітудно-частотна характеристика наведена на рис. 6, б.

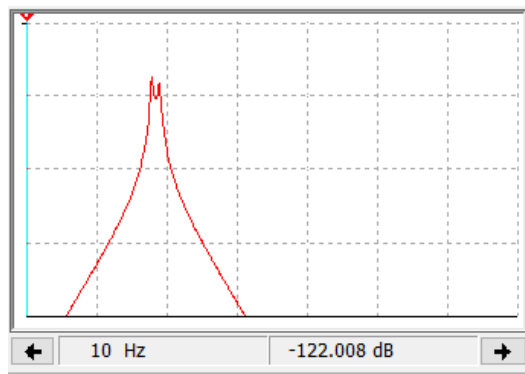
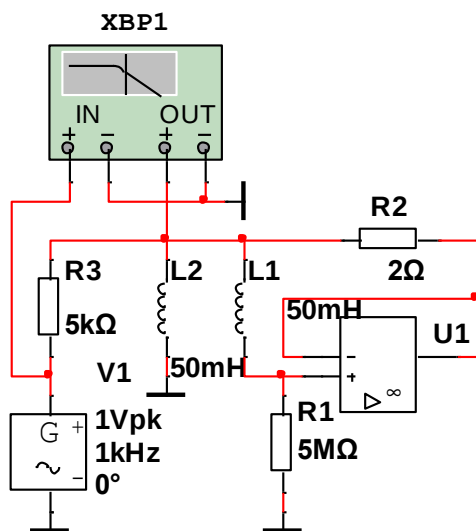
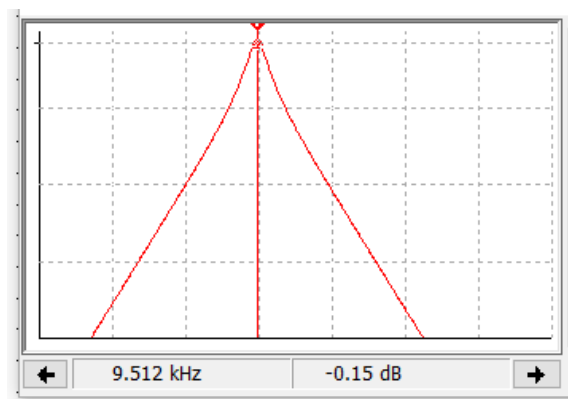


Рисунок 5



а



б

Рисунок 6

До недоліків таких схем слід віднести той факт, що далеко не всі ОП можуть бути використані для побудови гіратора. Модельними дослідженнями встановлено, що в тих випадках, коли коефіцієнт підсилення ОП в розімкненому стані не перевищує 70 дБ, реалізувати віртуальну індуктивність з його використанням не вдається.

#### Висновки.

1. Електронні схеми – гіратори в обмеженому частотному діапазоні можуть створювати електронні аналоги індуктивностей і конденсаторів, що можуть використовуватись в низькочастотних фільтрах різного функціонального призначення, забезпечуючи суттєве зменшення масо-габаритних показників таких фільтрів.
2. Для забезпечення високої ефективності перетворення опорів гіратором необхідно, щоб коефіцієнт підсилення операційного підсилювача в розімкнутому стані мав величини біля 100 дБ.

#### Список використаних джерел

1. Рябенський В.М. Схемотехніка електронних пристроїв та систем. Т. 1 Аналогова схемотехніка. Миколаїв : Ілліон, 2011. 390 с.
2. <https://bstudy.net/846603/tehnika/giratory>.
3. Horowitz P., Hill W. The Art of Electronics. – 3rd ed. – Cambridge : Cambridge University Press, 2015. – 1220 p.

## УДК 621.3

Рябенський В. М., д.т.н., Баліцький Н. О.

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв

## МОДЕЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕМБРОБЛОКУ

У сучасній побутовій електронній апаратурі темброблоки є невід'ємною частиною будь-якого підсилювача [1, 2]. Фактично темброблоки є полосовими фільтрами, складність яких визначається кількістю частотних полос корекції, а також коефіцієнтом підсилення (ослаблення) сигналу у вибраній полосі. Вони призначені для корекції частотних характеристик апаратури в залежності від умов роботи, оскільки якість звуку залежить від досить великої кількості факторів, до яких відносяться технічні характеристики електронної апаратури, акустичних властивостей приміщення, так і від уподобань слухача.

Темброблоки виготовляються як вмонтованими в підсилювач, так і як окремі приставки до підсилювача [1, 2]. Кількість полос корекції може бути від двох до семи, а величина коефіцієнта підсилення (послаблення) сигналу в полосі здебільшого не перевищує 8–2 дБ.

Головними показниками темброблоку повинні бути:

- точність відтворення частотного діапазону по кожній з полос;
- відсутність спотворення сигналу, тобто відсутність появи нелінійних спотворень в кожному з частотних під діапазонів;
- відсутність можливості появи допоміжних низькочастотних шумів;
- грубість по відношенню до розкиду параметрів елементів;
- забезпечення необхідної температурної стабільності в робочому діапазоні температур електронної апаратури.

Розглянемо з цієї точки зору одну з простих і поширених схем темброблоків, розрахованих на дві полоси корекції частоти, які використовуються як окремі модулі [3, 4], так і пристрої, що вмонтовуються здебільшого в недорогу (бюджетну) електронну апаратуру, наприклад, в автомобільні музикальні пристрої, схема якого наведена на рис. 1.

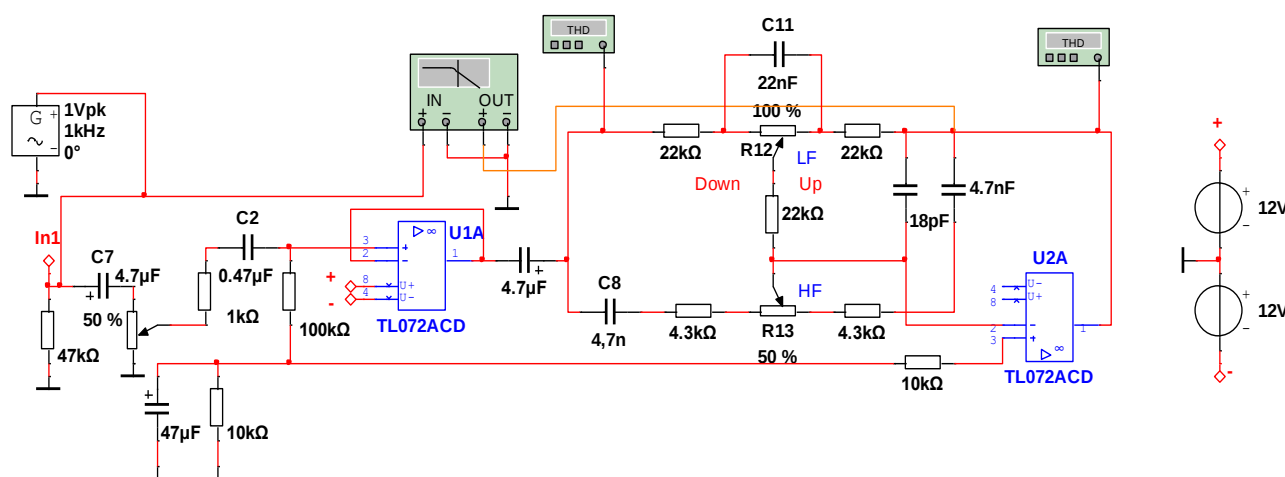


Рисунок 1 – Принципова схема темброблоку

Блок містить два паралельних канали – низьких (LF) і високих (HF) частот. Принцип регулювання підсилення (ослаблення) сигналу типовий і полягає у зміні відношення опорів зворотного зв'язку і вхідного операційного підсилювача U2A, що забезпечується потенціометрами R12 і R13. При середньому положенні повзунків цих резисторів частотна характеристика темброблоку наведена на рис. 2 з затуханням, що визначається резистором R6.

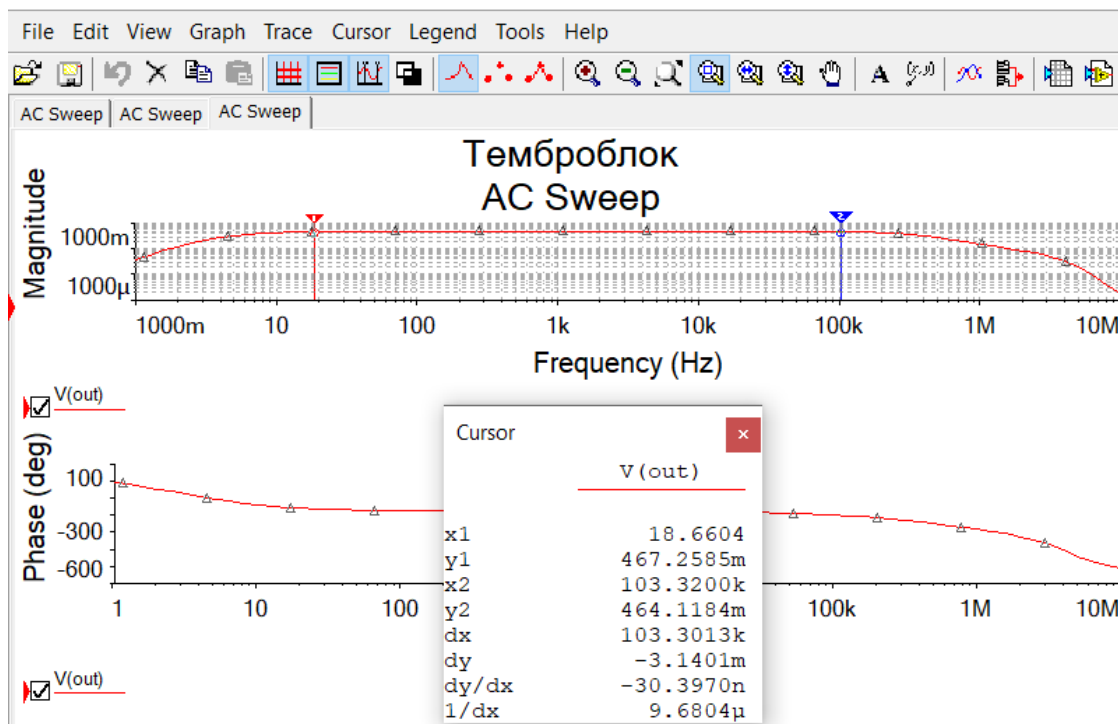


Рисунок 2 – Амплітудно-частотна і фазо-частотна характеристики темброблоку при відсутності регулювання амплітудних характеристик

На рис. 3, а, б, в, г наведені амплітудно-частотні характеристики, що демонструють роботу темброблоку. З аналізу амплітудно-частотних характеристик витікають наступні висновки його роботи:

- по кожному з каналів має місце регульоване підсилення (ослаблення) рівня сигналу в діапазоні від 10 до 20 дБ, що дещо перевищує прийняті норми, але це не слід вважати за недолік;
- розділення звукового частотного діапазону не має чіткого значення і має місце приблизно в діапазоні 2000–3000 Гц, що навіть нижче частотного діапазону телефонії, що можна вважати недоліком, який може бути скоригований конденсатором високочастотного піддіапазону;
- при регулюванні підсилення в одному частотному діапазоні має місце непередбачений вплив на підсилення в сусідньому частотному діапазоні, що буде ускладнювати якість налаштування звуку, що теж є суттєвим недоліком.

При проведенні оцінки появи нелінійних спотворень і їх рівня використовується Distortion Analyzer – XDA-1, який вимірює середньоквадратичне значення вищих гармонік (THD-total harmonic distortion), а також Фур'є аналізатор. Встановлено, що вже при рівні вхідного сигналу 1В на частоті 1 кГц величина коефіцієнта гармонік перевищує 0.8 %. Навіть на виході повторювача U1A величина THD досягав величини 0.001 %, що говорить про те, що операційний підсилювач (ОП) в даному випадку не відповідає вимогам. Збільшення амплітуди і частоти вхідного сигналу приводило до суттєвого зростання амплітуд і кількості вищих гармонік. Заміна ОП на більш якісний [5] (NE5532AIP) дозволила повністю усунути вищі гармоніки у вихідному сигналі.

Шумові характеристики промодельовати в Мультисім практично не можливо, оскільки в параметрах елементної бази не закладені можливості їх встановити. В той же час програма передбачає використання еквівалентного генератора шуму (Thermal noise), який дозволяє встановити рівень білого шуму і по шумовій доріжці осцилографа оцінювати шумові характеристики схеми. Стосовно схеми, що розглядається, можна стверджувати, що максимальними генераторами шуму будуть змінні резистори R12, R13, оскільки їх значні величини (100k) виключають можливість використання малошумних проволочних резисторів. В той же час порівняно високий рівень білого шуму піднімає нижній поріг чутливості схеми і, відповідно, зменшує її динамічний діапазон.

Розкид параметрів елементів схеми (tolerance) в межах 5 % не приводить до змін частотних характеристик та коефіцієнту передачі схеми.

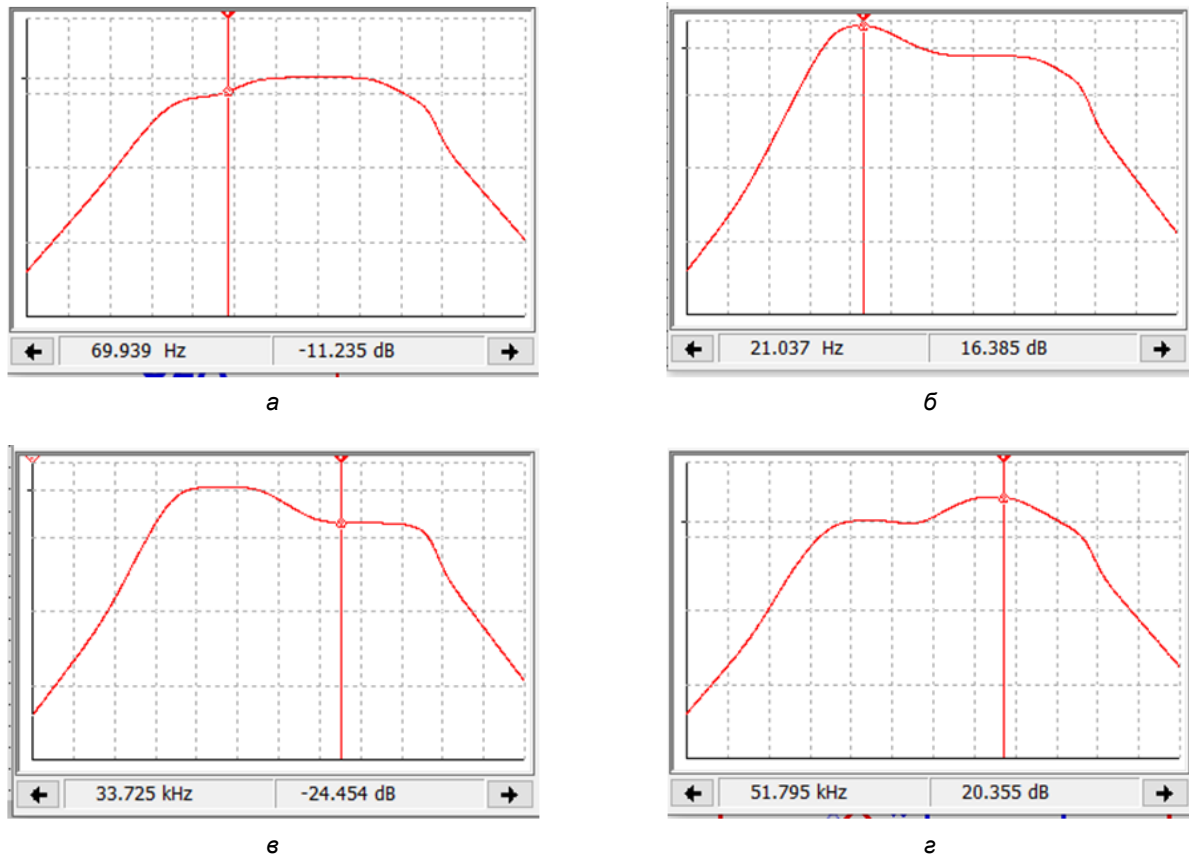


Рисунок 3 – Амплітудно-частотні характеристики темброблоку при максимальних значеннях регулювання: а, б – пониження, підсилення рівня сигналу в низькочастотному діапазоні; в, г – відповідно пониження, підсилення рівня сигналу високочастотного піддіапазону

Температурні зміни роботи схеми в межах 20–50°C (рис. 4) фактично не впливають на технічні характеристики темброблоку.

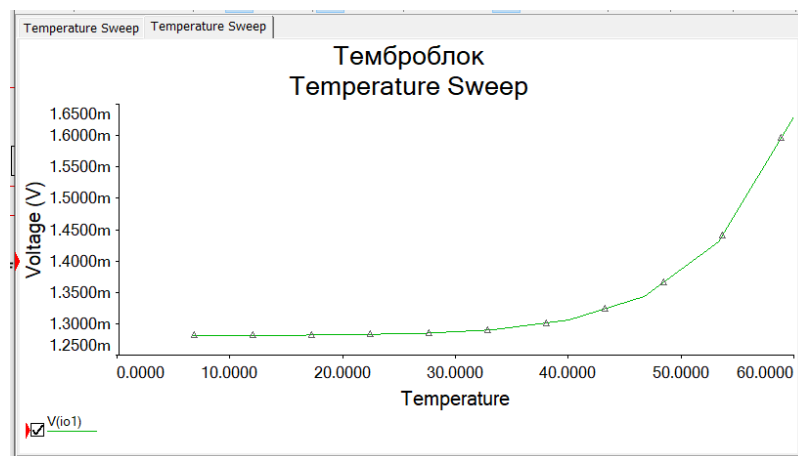


Рисунок 4 – Температурна залежність вихідного сигналу при зміні температури в межах 20–50°C

#### Висновок.

1. Схема темброблоку, що досліджувалась, має досить низькі технічні характеристики і не може бути рекомендована для використання.
2. Для покращення її технічних характеристик необхідно замінити операційні підсилювачі на NE5532AIP, або інші з подібними технічними характеристиками. Це дещо підвищить його вартість, але забезпечить сприятливі умови експлуатації.

**Список використаних джерел**

1. <https://www.youtube.com/watch?v=yGFn7VvddJA>
2. <https://www.youtube.com/watch?v=F7leRxBYw>
3. [https://www.youtube.com/watch?v=2Gp\\_AlyJMIQ](https://www.youtube.com/watch?v=2Gp_AlyJMIQ)
4. <https://radiohata.com/magazine-radiolyubitel>
5. Рябенський Д.М., Співак В.М. Моделювання пристроїв обробки аналогових сигналів. – Миколаїв : НУК, 2018. – 362 с.

**УДК 681.5***Якубець К. В., Герасін О. С., к.т.н.**Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв***СИСТЕМА ВІЗУАЛІЗАЦІЇ КЕРОВАНОГО ФУНКЦІОНУВАННЯ  
МОБІЛЬНОГО РОБОТА**

За останні десятиліття широкого розповсюдження набувають різні підходи зі сфери комп'ютерних наук для покращення власної роботи, найбільшого впливу зазнала сфера робототехніки. Так як адаптація до зовнішніх умов потребує різних форм, датчиків, сенсорів та ефективних алгоритмів, то роботи повинні мати змогу до прийняття розумних рішень. Основною проблемою робототехніки є різноманітність зовнішнього середовища, що спричиняє великі складнощі для пересування роботів. Для прикладу промислові чи навіть житлові приміщення мають вельми просте планування, яке майже не ускладнює пошук оптимального шляху. Як наслідок, розробники мають брати до уваги різні варіації навколишнього середовища та реалізовувати нові, більш універсальні системи, що допоможуть розширити сферу застосування їх виробу.

Однак, велика частина розробників зіштовхуються з другою проблемою – чим вища якість параметрів робота, тим набагато більші необхідні затрати. Таке співвідношення виникає через процес багаторічної розробки робота, для якого необхідні варіативні знання з різних спеціалізацій. Основними є: алгоритми для переміщення, інженерна частина, навігація, отримання інформації про середовище та набагато більше. Як наслідок виникає вимога у створенні спеціального симулятора робота для проведення моделювань та оцінки результатів роботи певних створених алгоритмів без втрати великої частини бюджету на відновлення [1].

**Актуальність теми** полягає в зменшенні виробничих витрат для перевірки результативності функціонування мобільних роботів. Так як чим складніший та високоякісніший робот, тим відповідно й набагато більші затрати на його розробку.

**Метою роботи** є розробка системи візуалізації мобільних роботів для безпечної перевірки якості їх функціонування під керуванням оператора або використовуючи інтелектуальні засоби керування на ранніх етапах створення, що допоможе зменшити витрати часу, матеріалів та витрат на збірку фізичної моделі.

На сьогодні найбільш поширеним типом роботів є промислові, які використовуються в різних галузях промисловості та становлять приблизно 80 % від загальної кількості роботів у світі. Водночас промислові роботи поділяються на численні підтипи, що мають вузькоспеціалізоване призначення, зокрема: роботи для фарбування, зварювання, транспортування, обслуговування верстатів, пресів, ливарного обладнання тощо.

Окрім функціонального призначення, роботів часто класифікують за конструктивними ознаками. Однією з цих ознак є рухливість, яка обумовлюється наявністю системи пересування. Якщо така система присутня, то робот класифікується як мобільний, інакше – як стаціонарний. Вибір типу пересування визначається сферою застосування: це можуть бути колісні або гусеничні шасі для переміщення по твердих поверхнях, а також спеціалізовані платформи для пересування у воді, під землею, у повітрі чи навіть у космічному просторі. У сфері робототехніки також виділяють крокуючий спосіб пересування, який має низку специфічних особливостей [2].

Системи живлення та утримання на поверхні, приводи переміщення чи сенсори аналізу навколишнього середовища, система керування і технологічне оснащення, усе це – основні частини загальної картини робота. Апаратною реалізацією системи керування зазвичай виступає спеціалізований контролер або деякий скрипт, що завантажують у процесор. А використовуючи сенсорні системи робот може отримувати відомості про топологію робочого простору, який можна відобразити у декартовій (X,Y,Z) або сферичній (R,  $\beta$ ,  $\gamma$ ) системах координат.

Сенсорні датчики є найменш енергозатратними серед усіх частин робота, система керування також у цій категорії. В свою чергу, система для утримання на поверхні та приводи переміщення вимагають найбільших енергетичних витрат, в деяких випадках пристрої технічного оснащення також використовують джерело живлення

робота. Трансмісію робота ж обирають в залежності від системи приводів яка їй відповідає за рух елементів робота, іншим критерієм є система координат (декартова, сферична, ангулярна чи циліндрична) та рельєф поверхні переміщення [3].

Під час симуляції функціонування робота має місце реалізація певних засобів для допомоги роботу щоб самостійно дістатися до заданої точки для виконання свого завдання чи при зменшенні ресурсів до критичної точки. Через це увагу приділяють системі пошуку шляху, яка знаходить найоптимальніший маршрут від поточного місцезнаходження до назначеної позиції на карті. На сьогоднішній день існує велике різноманіття реалізованих систем які мають назву «алгоритми пошуку оптимального шляху». У даній роботі розглядається алгоритм  $A^*$  (А-стар), який є одним з найвідоміший був розроблений в 1968 році Полом Хартом, Нільсом Нільсоном і Бертрамом Рафаелем як модифікація алгоритму Дейкстри є алгоритм  $A^*$ . Він вийшов не дуже складним для розуміння та імплементації до систем.

Прораховуючи цінність шляху для кінцевої точки, цей алгоритм знаходить шлях який є найоптимізованишим і має найменшу відносну цінність. З кожним кроком він прямує вперед до цілі за найменшою евристичною оцінкою, відкладаючи групу з послідовних секторів шляху. Висока точність алгоритму обумовлюється тим, що він записує вже прораховані клітини та складає найкоротший маршрут. Базовий принцип роботи цього алгоритму базується на наступній формулі:

$$F(x) = G(x) + H(x), \quad (1.1)$$

де  $x$  – це сектор поточного місцезнаходження;

$G(x)$  – дистанція з початкової клітини до  $x$ ;

$H(x)$  – евристична функція, що оцінює вартість найдешевшого шляху з  $x$  до фінальної точки (рис. 1). Кожен сектор отримує загальну оцінку  $F$ , за допомогою якої і буде побудований найоптимальніший маршрут [4, 6].

У сучасну епоху математичні моделі стають дедалі складнішими, і їх реалізація без використання комп'ютерів або вбудованих контролерів є практично неможливою. Для цього було розроблено безліч програмних засобів і середовищ моделювання, таких як MathCad, MatLab, Mathematica, Maple, Derive, VisSim, Genius та інші. Ці інструменти суттєво спрощують процес математичного моделювання, дозволяючи ефективно вирішувати поставлені завдання. Окрім суто математичних пакетів, у сфері моделювання активно застосовуються 3D-середовища, які використовуються для розробки віртуальних середовищ та симуляцій. До найвідоміших серед них належать кросплатформні ігрові рушії, такі як: Unity, Unreal Engine, Godot, CryEngine та багато інших.

Оскільки тематика роботи безпосередньо пов'язана з використанням ігрових рушіїв, далі розглянуто два найпопулярніші з них: Unity та Unreal Engine, які є провідними інструментами для створення тривимірних віртуальних світів та інтерактивних симуляцій [5].

Звівши інформацію щодо вимог на розробку можна обрати середовище візуалізації для роботи. Після порівняння двох найвідоміших рушіїв, було прийняте рішення обрати рушій Unreal Engine 5. Його вбудований функціонал майже не відрізняється від рушія Unity, проте він є більш зручним у використанні та освоєнні, а також містить велику довідкову систему. Після чого створено карту для моделювань за допомогою вбудованих засобів середовища (рис. 1).

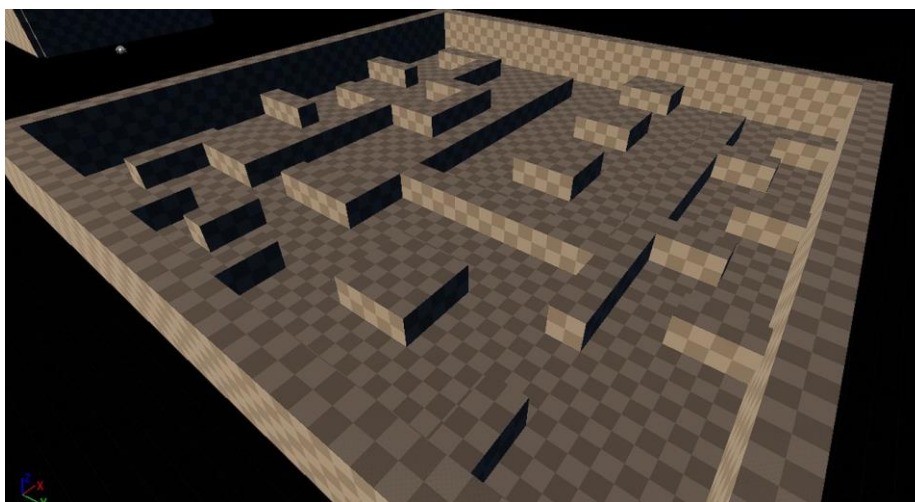


Рисунок 1 – Макет рівня для моделювання

Для середовища моделювання було реалізовано наступні моделі роботів (рис. 2–3). У процесі їх створення було використано програмне забезпечення для 3D-моделювання Blender. Корпус виконано зі звичайного паралелепіпеда, а колеса у формі сфери, гусениці створені з кільця, яке було модифіковане.

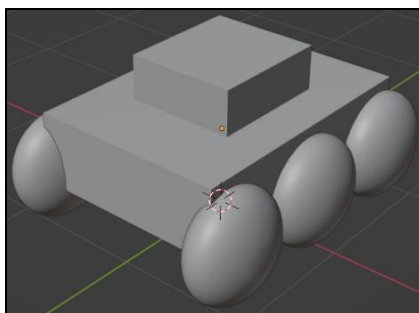


Рисунок 2 – Модель колісного робота

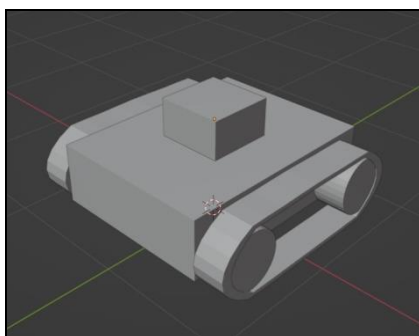


Рисунок 3 – Модель гусеничного робота

Для організації руху були створені окремі події, які відповідають за переміщення вперед і назад, а також за повороти – як за годинниковою стрілкою, так і проти неї. Крім того, було додано обмеження логіки керування, що підвищує реалізм: коли робот рухається вперед, функція повороту стає недоступною, і навпаки – під час повороту блокуються команди руху вперед. Такий підхід дозволяє уникнути конфліктів у керуванні та спрощує загальну логіку переміщення (рис. 4).

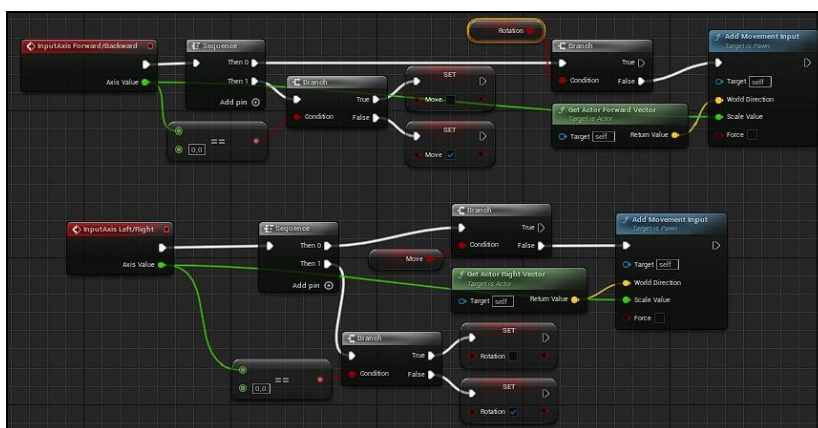


Рисунок 4 – Реалізація коду управління

У даній роботі створено користувацький інтерфейс, який у середовищі Unreal Engine реалізується за допомогою компоненту Widget. Такий інтерфейс може бути основним (головним) або допоміжним. У першому випадку головний віджет виконує роль контейнера, який об'єднує кілька допоміжних елементів, кожен з яких створюється окремо для виконання конкретної функції – наприклад, глайдера керування, індикатора заряду або інформаційного поля. Такий підхід забезпечує структурованість, гнучкість та зручність масштабування користувацького інтерфейсу, що є важливим при роботі з інтерактивними симуляціями в Unreal Engine (рис. 5–7).

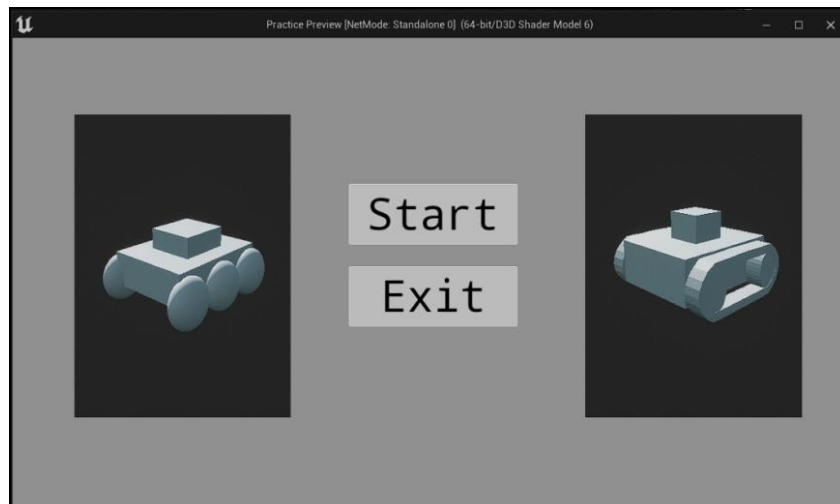


Рисунок 5 – Вікно стартового екрану

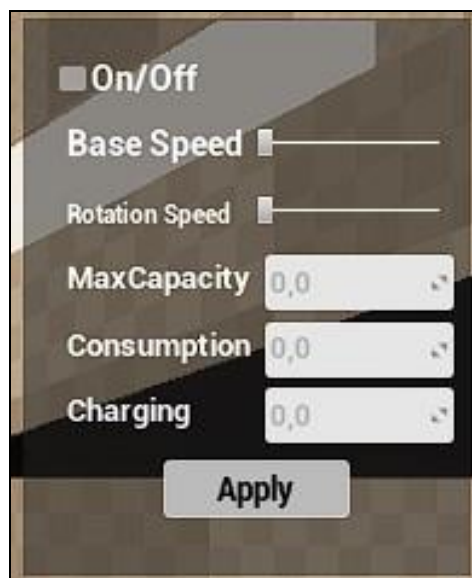


Рисунок 6 – Вікно встановлення базових параметрів

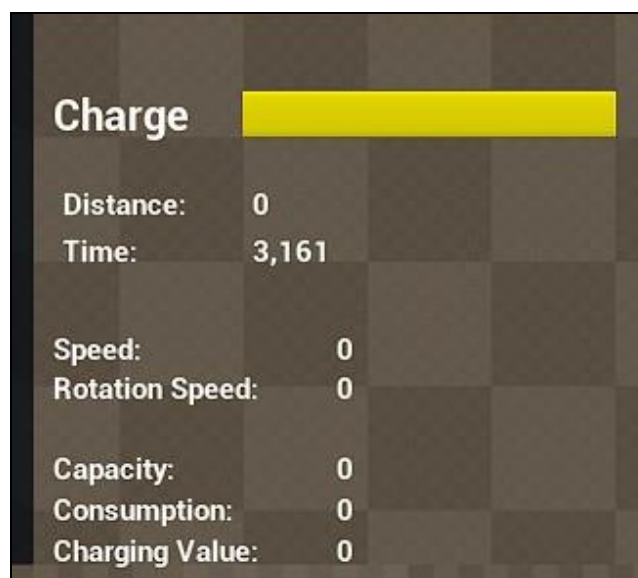


Рисунок 7 – Вікно візуалізації стану поточних параметрів

Після проведення тестових моделювань було отримано наступні результати, які було зведено у табл. 1 та табл. 2. Для порівняння отриманих результатів створено діаграму, яку зображено на рис. 8.

Таблиця 1 – Результати тестувань колісного робота на місцевості різних типів

| Відстань, м          |      |      | Час, с |     |      | Швидкість, м/с |
|----------------------|------|------|--------|-----|------|----------------|
| 1                    | 2    | 3    |        |     |      |                |
| 13,7                 | 27,5 | 11,2 | 1      | 2   | 3    |                |
| Рівна поверхня       |      |      | 2.7    | 5.6 | 2.26 | 5.5            |
| Бездоріжжя           |      |      | 3.6    | 7.8 | 2.9  | 3.68           |
| Болотиста місцевість |      |      | 8.4    | 17  | 7    | 1.65           |

Таблиця 2 – Результати тестувань гусеничного робота на місцевості різних типів

| Відстань, м          |      |      | Час, с |      |     | Швидкість, м/с |
|----------------------|------|------|--------|------|-----|----------------|
| 1                    | 2    | 3    |        |      |     |                |
| 13,7                 | 27,5 | 11,2 | 1      | 2    | 3   |                |
| Рівна поверхня       |      |      | 6.9    | 13.7 | 5.4 | 2              |
| Бездоріжжя           |      |      | 9.2    | 18.5 | 7.2 | 1.6            |
| Болотиста місцевість |      |      | 11.4   | 22.2 | 9   | 1.2            |

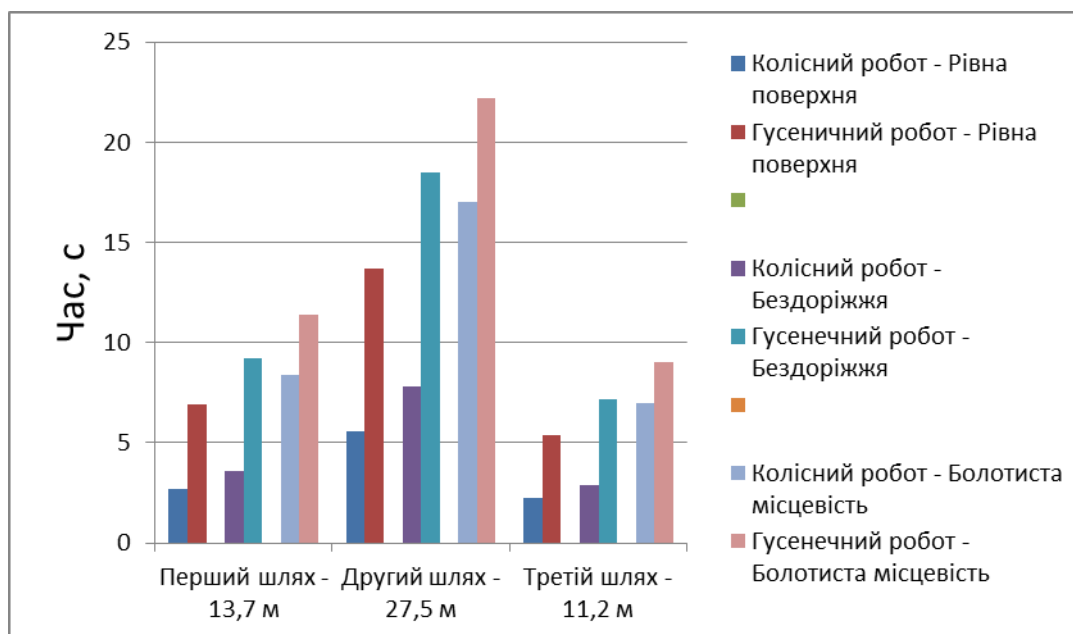


Рисунок 8 – Діаграма часових витрат на подолання шляху для колісного та гусеничного роботів

**Висновки.** Отже, для досягнення поставленої мети було проаналізовано сучасну класифікацію роботів та їх базові принципи функціонування, розглянуто існуючі методи пошуку шляху і програмні середовища для візуалізації, як результат реалізовано систему візуалізації функціонування мобільного робота для безпечної перевірки якості їх функціонування. Отримані дані дозволять зменшити витрати часу, матеріалів та затрат на збірку фізичної моделі роботів.

#### Список використаних джерел

- 1 Нестеров М.С. Розробка симулятора робота-прибиральника у 3D-середовищі. 2020. С. 43. URL: <https://ekmair.ukma.edu.ua/6c326b9a-91b9-4417-a51b-cd2c00c9775f>
- 2 6 типів роботів та їх характеристика. URL: <https://uk.warbletoncouncil.org/los-6-tipos-robots-principales-15683>

- 3 Виробництво & Мехатронні Системи 2023 : матеріали VII Міжнародної конференції, Харків, 19–20 жовт. 2023 р. / І. Ш. Невлюдов (відповід. ред.). – Харків, 2023. – 163 с.
- 4 Султанова А. Б. Сравнительный анализ алгоритмов поиска оптимального пути // Бюллетень науки и практики. 2020. Т. 6. № 12. С. 248-255. <https://doi.org/10.33619/2414-2948/61/25>
- 5 Комп'ютерні моделювання систем та процесів. Методи обчислень. Ч. 1. URL: [https://web.posibnyky.vntu.edu.ua/fksa/2kvetnyj\\_komp'yuterne\\_modelyuvannya\\_system\\_procesiv/t1/171.htm](https://web.posibnyky.vntu.edu.ua/fksa/2kvetnyj_komp'yuterne_modelyuvannya_system_procesiv/t1/171.htm)
- 6 Gerasin O.S., Topalov A.M., Zaytsev V.V., Zaytsev D.V., Susak O. M., Savchenko O.V. Information System for Calculating the Shortest Route for a Mobile Robot in a Multilevel Environment based on Unity. ICTERI 2023: Information and Communication Technologies in Education, Research, and Industrial Applications. September 18–22, 2023, Ivano-Frankivsk. – P. 53–64.
- 7 Kondratenko Y., Gerasin O., Kozlov O., Topalov A., Kilimanov B.: Inspection mobile robot's control system with remote IoT-based data transmission. Journal of Mobile Multimedia 17(4). 499-522 (2021).

УДК 621.314

Стрункін Г. М., інженер-конструктор  
ТОВ «Плутон ІС», м. Запоріжжя

## ДОСВІД РОЗРОБКИ СНАББЕРА ДЛЯ ЧОППЕРА ТЯГОВОЇ ПІДСТАНЦІЇ

Розробка снабберів потужних перетворювачів – це своєрідне мистецтво інженера силової електроніки. Крім детального розуміння процесів при комутації у напівпровідникових приладах, характеру роботи схеми, іноді не обійтися без моделювання, експерименту та навіть інтуїції, що заснована на досвіді, як справедливо зазначив професор S. Ben-Yaakov у своїй філософії викладання силової електроніки [1].

Для захисту тягових мереж міського електротранспорту в ТОВ «Плутон ІС» було розроблено обмежувач перенапруг, який являє собою потужний чоппер, який стабілізує напругу на збірних шинах підстанції шляхом розсіювання енергії на блоку резисторів [2].

При проектуванні обмежувача перенапруг виникла задача обрати структуру та параметри снаббера – пристрою для формування безпечної траєкторії перемикання IGBT. В літературі наведено аналіз простих снабберних схем для чопперу [3–5], але при роботі перетворювача від контактної мережі міського електротранспорту з розгалуженими параметрами нема можливості визначити індуктивність колекторного ланцюга. А рекомендації по використанню у якості снаббера поодинокі ємності, яку підключено між колектором та емітером силового транзистора, не можуть бути використані через конструктивні особливості чопперних модулів, які виробляє, наприклад, Semikron [6]. Зважаючи на це, вибір схеми снабберу та розрахунок його параметрів для кожного перетворювача стає новим інженерним завданням.

**Метою роботи** є презентація досвіду розробки снаббера для потужного чоппера при його роботі від контактної мережі постійного струму.

### Структура снабберу для потужного чоппера

Згідно з технічним завданням, чоппер повинен працювати з робочим струмом 600 А, причому використовуватися багатофазне перетворення для зменшення пульсацій струму та шумового випромінювання на підстанції. Обрано варіант з розташуванням 4 перетворювачів у паралель зі зсувом фаз на 90 градусів. Таким чином, струм, який комутує один чоппер, дорівнює 150А. У якості силового напівпровідникового приладу обрано транзисторний модуль SKM400GAR176D, який являє собою чоппер (транзистор зі зворотним діодом). Виведення транзистора в означеному модулі – 1 і 3, що відповідає відстані 56 мм. Серед плівкових конденсаторів МКР, які призначено для безпосереднього встановлення на транзистор, з такою відстанню є типовиконання ТЗ. Але цей корпус має виводи, що направлено вперед і назад, а не вбік конденсатора. Тому він спиратиметься на гвинт середнього виведення 2 (анод зворотного діода) модуля, що є неприпустимим. Через відсутність типономіналу конденсатора для таких модулів, а також через специфіку роботи схеми, було запрошено рекомендацій в українського представника фірми Semikron в Україні – Техносервіспривід. Спеціалістами фірми Т. В. Мисаком та В. В. Чопиком було запропоновано для розгляду схему комбінованого снабберу, який задовольняв би технічному завданню.

Схему снаббера для потужного чоппера представлено на рис. 1.

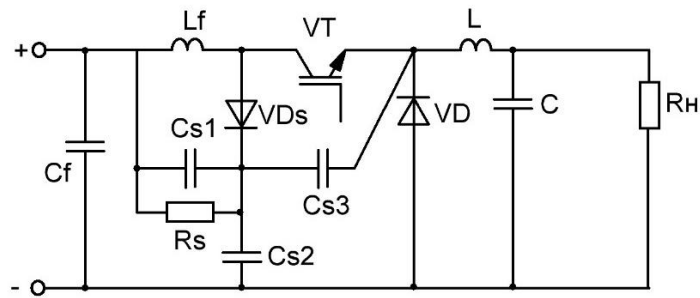


Рисунок 1 – Схема снаббера потужного чоппера

Транзистор VT та діод VD утворюють чоппер – імпульсний перетворювач постійної напруги, або BUCK-converter [7], який працює з максимальним коефіцієнтом заповнення 0,8 та частотою  $f = 1$  кГц. Дросель L та конденсатор C – згладжуючий фільтр. У якості навантаження використано стійки блоків резисторів БР6 Rн. Снаббер включення складається з індуктивності Ls, яка зменшує швидкість наростання струму колектору  $I_k$ , тим самим вводячи затримку включення транзистора відносно обриву зворотного струму діода VD. Її обрано з наступних міркувань. Обрив зворотного струму діода проходить за час приблизно 0,25 мкс [6]. Таким чином, затримка часу на включення транзистора повинна становити  $t_s = 0,5 - 1$  мкс [3]. Для амплітуди колекторного струму в 150 А можна приблизно оцінити потрібну швидкість наростання струму:

$$\frac{di}{dt} = \frac{I_k}{t_s}. \quad (1)$$

Тоді індуктивність Ls можна визначити

$$L_s = \frac{U_k}{\frac{di}{dt}}. \quad (2)$$

У виразі (2)  $U_k$  – напруга колектору.

Для наявних параметрів (робоча напруга до 900 В) індуктивність становить 4 мкГн. На практиці її виготовлено з гнучкого кабелю ВВГнг 16 мм<sup>2</sup>. Три таких кабелів переплетено у «косицю-колосок», яку змотали у котушку діаметром 210 мм та кількістю витків – 3. Такий спосіб виготовлення котушки дозволяє знизити прояв скін-ефекту.

При вимиканні транзистора енергія, що накопичена у Ls, через імпульсний діод типу SKN60F17 заряджає конденсатор Cs1, який обирають із балансу енергій:

$$C_{s1} = \frac{L_s I_k^2}{\Delta U^2}, \quad (3)$$

де  $\Delta U$  – зміна напруги на конденсаторі снабберу. Для практичних розрахунків можна завдати 300 В. Таким чином, конденсатор снабберу Cs1 типу МКР має ємність 1 мкФ. Його робоча напруга повинна перевищувати робочу напругу транзистора. Опір резистора Rs, через який розсіюється енергія, що була поглинута конденсатором Cs1, обирається з урахуванням того факту, що повний розряд конденсатора повинен відбуватись за час вимкненого стану транзистора, тобто з урахуванням коефіцієнту заповнення 0,8:

$$R_s = \frac{\tau}{3 \cdot C_s} = \frac{(1-0,8) \cdot 1/f}{3 \cdot C_s}. \quad (4)$$

Таким чином, розраховано значення опору резистора Rs в 100 Ом. Потужність резистора типу N-HS дорівнює добутку енергії, яку запасено в індуктивності Ls та частоти комутації. Вона є значною, тому резистор розташовано на охолоджувачі.

Конденсатори плівкового типу аксіальної конструкції типу PMB Cs2 та Cs3 встановлюють для демпфування високочастотних коливань при вимкненні транзистора. Їх ємність становить 22 нФ.

Декілька слів про конденсатор Cf. Його призначення – замкнути через себе високочастотну складову струму, яка виникає при комутації транзистора. Відповідно, його ємність повинна бути обрана з урахуванням того, що амплітуда струму, який протікатиме через них, становить 150 А. Через це їх виконано у вигляді батареї плівкових конденсаторів типу E53, а для підключення до шин постійного струму використано шини типу «сендвіч».

На рис. 2 наведено фотографію чоппера при випробуваннях його у лабораторії ТОВ «Плутон ІС».



Рисунок 2 – Фотографія чоппера при його випробуваннях

Модуль SKM400GAR176D та резистори  $R_s$  (3 штуки N-HS300-330RJ включені у паралель) розташовано на охолоджувачі, який обдувають вентилятори. В шахту вентиляторів також винесено й індуктивність  $L_s$ . Добре видно «сендвіч», за допомогою якого зібрано батарею конденсаторів  $C_f$ .

#### Випробування потужного чоппера з розрахованим снаббером

Після складання чоппера його випробувано за програмою та методикою випробувань у лабораторії ТОВ «Плутон ІС». Осцилограма перенапруги на транзисторі при його вимиканні зображена на рис. 3.

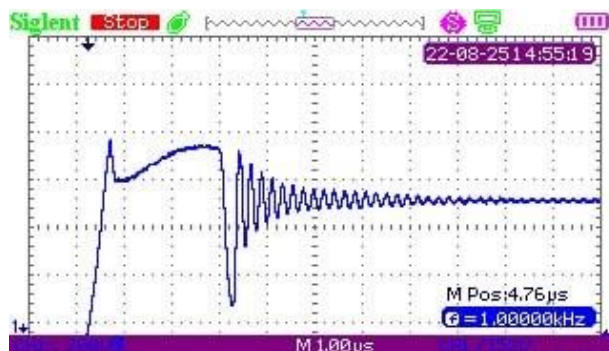


Рисунок 3 – Осцилограма перенапруги на транзисторі

Як можна побачити, при робочій напрузі на колекторі транзистора VT близько 600 В перенапруги сягають рівня 810 В, що складає рівень 35 %. Враховуючи, що закладений у розрахунок рівень перенапруг складає  $600 + 300 = 900$  В, тобто 50 %, завдання створення ефективного снаббера для потужного чоппера можна вважати виконаним.

**Висновки.** Наведено відомості про особливості проектування снаббера потужного чоппера при його роботі від контактної мережі постійного струму. Методика розрахунку елементів снаббера, яку запропоновано у роботі, дозволила створити снаббер із заданими параметрами, ефективність роботи якого підтверджено практично.

#### Список використаних джерел

1. The Role of Intuition in Power Electronics: Contributions by S. Ben-Yaakov. URL: <https://www.linkedin.com/pulse/role-intuition-power-electronics-contributions-shmuel-sam--amc0e/?trackingId=PvS5vZM6RxGqRVvn1bejPw%3D%3D> (дата звернення 29.10.2025).
2. Стрункін, Г. (2025). Обмежувач напруги для тягових підстанцій міського електротранспорту. Технічні науки та технології, (1 (39), 307–314. doi: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-1\(39\)-307-314](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-1(39)-307-314).

3. Barry W. Williams Principles and Elements of Power Electronics. Devices, Drivers, Applications, and Passive Components. 2006. – 1432 p.
4. Воронин П.А. Силовые полупроводниковые ключи: семейства, характеристики, применение. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М. : Додэка–XXI, 2005. – 384 с.
5. A. Rodrigues Vaz and F. Lessa Tofoli, "Practical design of a DC-DC buck converter using an RCD snubber," 2017 Brazilian Power Electronics Conference (COBEP), Juiz de Fora, Brazil, 2017, pp. 1–6, doi: <https://doi.org/10.1109/COBEP.2017.8257240>.
6. <https://www.semikron-danfoss.com/products/p/skm400gar176d-21916970?tab=documents> (дата звернення 29.10.2025).
7. Brown M. Power Supply Cookbook. Elsevier, 2001, 257 p. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-7329-7.X5000-4>.

## УДК 629

Рибак О. Б., Бабкін Г. В., к.т.н.

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв

# МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ ЯК БАЗОВА СКЛАДОВА ПРОЦЕСУ ЇХ РОЗРОБКИ

Робототехніка є однією з областей техніки, що найбільш динамічно розвиваються. Це з тим, що є безліч процесів, потребують повної чи часткової автоматизації. Але розробка та конструювання робототехнічних засобів – довгий, трудомісткий та дорогий процес. Зниження трудомісткості, вартості та часу розробки таких систем можна досягти шляхом використання бібліотек готових рішень, що містять підсистеми управління робототехнічними компонентами. Такий підхід дозволяє знизити вимоги до рівня підготовки розробників.

Мета роботи: зниження трудомісткості проектування робототехнічних систем (РТС) шляхом застосування засобів віртуального прототипування робототехнічних компонентів.

Завдання, які вирішуються у роботі:

- створення бібліотеки готових рішень модульних компонент РТС;
- розробка моделі модульного крокуючого робота;
- розробка алгоритму керування модульними компонентами;
- розробка алгоритму управління модульною роботизованою системою;
- натурна реалізація прототипу модульного крокуючого робота на основі моделі з бібліотеки готових рішень;
- виконання експериментальних досліджень одержаного прототипу.

Процес розробки робототехнічних засобів поділяється такі етапи [1]:

- концепція формування. Визначення цілей створення об'єкта. Опис функціональних особливостей об'єкта та принципів роботи об'єкта;
- науково-дослідна робота. Розробка моделі об'єкта та середовища застосування. Коригування вихідного уявлення про об'єкт з урахуванням результату моделювання;
- реалізація. Втілення моделі у натурну реалізацію системи;
- дослідження. Вивчення втіленого об'єкта, виявлення переваг та недоліків. При виявленні останніх необхідно повернутися на один із попередніх етапів та провести модернізацію системи (рис. 1).

Конструювання робототехнічної системи – це технічно складне завдання. Тому етап реалізації – довгий і трудомісткий процес. Це пов'язано з тим, що необхідно поєднати різні програмні та апаратні компоненти в єдину систему. Одним із підходів до реалізації робототехнічних засобів є інтеграційний підхід (рис. 2). Інтеграційний підхід включає у собі такі етапи [2]:

- купівля деталей;
- інтеграція. Об'єднання деталей у сполучену систему. Найбільш трудомісткий процес;
- побудова робота;
- програмування алгоритмів керування;
- тестування та адаптація робототехнічної системи;
- отримання прототипу.

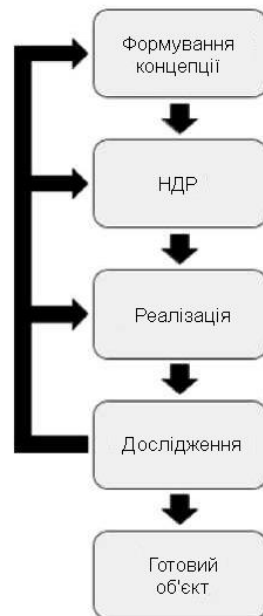


Рисунок 1 – Схематичне зображення процесу розробки РТС

Конструювання робототехнічної системи – це технічно складне завдання. Тому етап реалізації – довгий і трудомісткий процес. Це пов'язано з тим, що необхідно поєднати різні програмні та апаратні компоненти в єдину систему. Одним із підходів до реалізації робототехнічних засобів є інтеграційний підхід (рис. 2). Інтеграційний підхід включає у собі такі етапи [2]:

- купівля деталей;
- інтеграція. Об'єднання деталей у сполучену систему. Найбільш трудомісткий процес;
- побудова робота;
- програмування алгоритмів керування;
- тестування та адаптація робототехнічної системи;
- отримання прототипу.



Рисунок 2 – Інтеграційний підхід

Розробники можуть мати проблеми вже на етапі інтеграції через несумісність компонентів. Крім того, кожна модифікація системи вимагає подальшої інтеграції, а використання модулів, що вийшли, повторно дорогий і трудомісткий процес.

Модульний підхід до розробки (рис. 3) або модульність, ділить систему більш дрібні і схожі частини, звані модулями, які можна налаштовувати, модернізувати, ремонтувати, масштабувати та повторно використовувати. Концепція модульності не нова, і її можна простежити до Другої світової війни, коли Отто Меркер досліджував як модульність може бути реалізована при конструюванні німецьких підводних човнів.

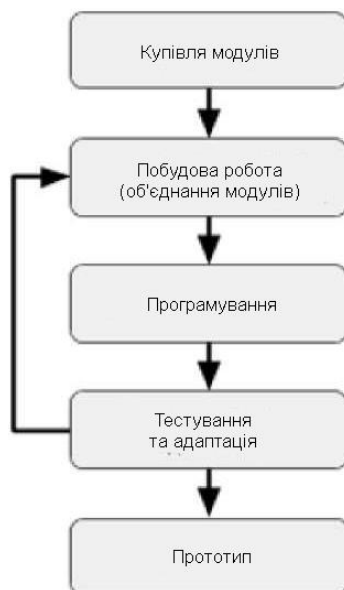


Рисунок 3 – Модульний підхід

Модульність є одним із головних наріжних каменів у майбутньому робототехніки. Створення легко сумісних компонентів різних виробників – це лише один приклад того, як потенціал галузі може бути значною мірою розкритий завдяки модульності. Фактично, інтеграція є одним із найбільш трудомістких та ресурсомістких вузьких місць у прикладній робототехніці. Інтеграція частин робота обходиться набагато дорожче, ніж їх виготовлення чи програмування.

Такий підхід дозволив знизити час розробки системи та трудомісткість і навіть підвищити якість отриманого РТС.

Через ускладнення роботизованих систем та різноманітності апаратного забезпечення міжплатформне програмне забезпечення роботів застосовується для розробки та інтеграції компонентів апаратного та програмного забезпечення. Такі системи спрощують інтеграцію нових компонентів, розробку програмного забезпечення, що дозволяє абстрагуватися від низькорівневого зв'язку. Використання міжплатформного програмного забезпечення (рис. 4) у робототехніці підвищує якість програмного забезпечення.

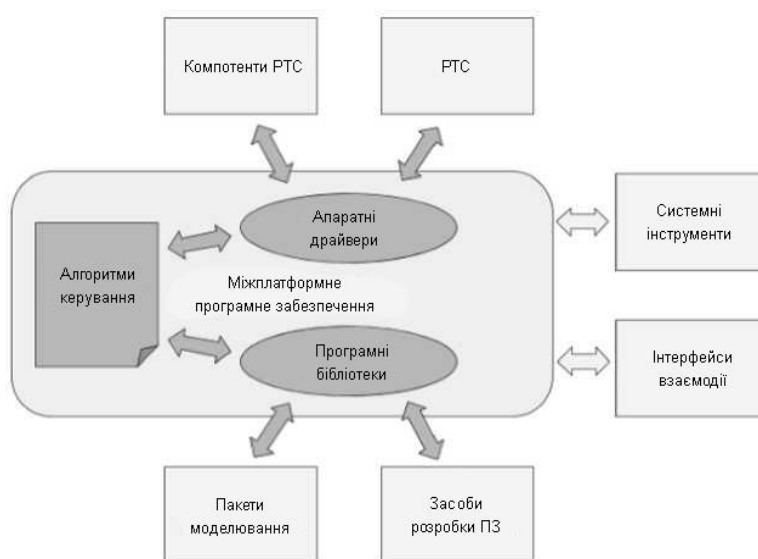


Рисунок 4 – Узагальнена структура міжплатформного програмного забезпечення

У даний час існує багато пакетів моделювання, які дозволяють спростити створення прототипів робототехнічних засобів. Сучасні тенденції диктують вимоги до функціональних особливостей таких інструментів, тому більшість ними схожі [3]. Пакети моделювання мають фізичний та графічний двигун. Фізичний двигун відповідає за розрахунок динамічних показників об'єктів сцени. Графічний двигун візуалізує дані, розраховані пакетом для представлення їх у зручній для людини формі. Типова архітектура пакета моделювання представлена на рис. 5.

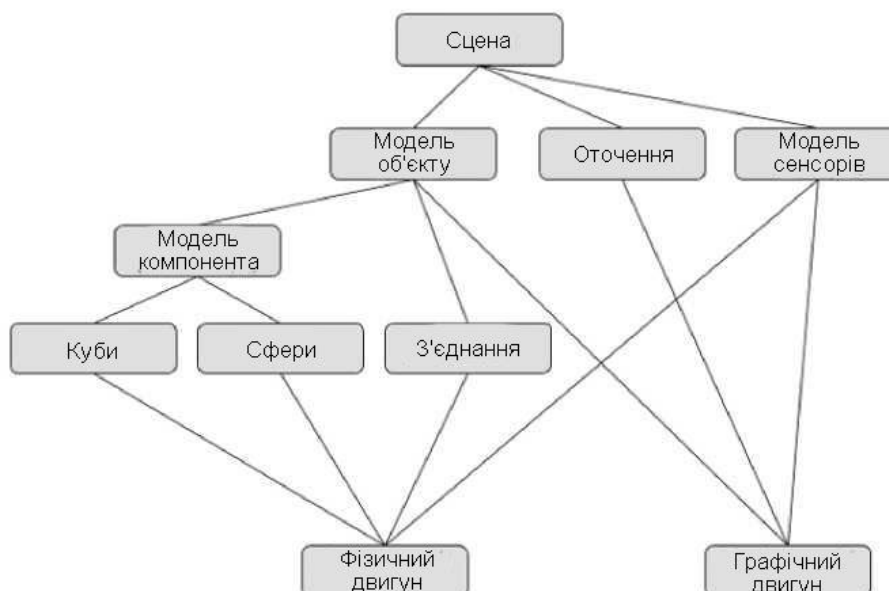


Рисунок 5 – Схема взаємодії компонентів пакетів моделювання

У роботі розглядаються пакети моделювання, які користуються популярністю у спільноти розробників.

Gazebo призначений для точного відтворення динамічного середовища, з яким може зіткнутися робот [4, 5]. Усі змодельовані об'єкти мають масу, швидкість, тертя та численні інші атрибути, які дозволяють їм вести себе реалістично за зовнішнього впливу.

Особливістю пакета є відкритість вихідного коду, що дозволяє спільноті брати участь у покращенні можливостей проєкту, створювати різні плагіни та бібліотеки.

Першим етапом у проєктуванні РТС є віртуальне прототипування натурної реалізації інтелектуального компонента. Віртуальний прототип – це сукупність візуального та керуючого елементів:

- модель інтелектуального робототехнічного компонента;
- керуюче та міжплатформне програмне забезпечення.

Для створення модульного інтелектуального компонента для бібліотеки готових рішень необхідно створити модель з примітивів, представлених у пакеті моделювання. Кожен примітив має свої параметри. Для створення якісної моделі необхідно враховувати ці параметри. Усі елементи конструкції поєднуються в ієрархію. У елемента, що знаходиться на вершині ієрархії, необхідно вказати, що він є базовим елементом конструкції, щоб модель стала цілісною.

Після створення моделі компонента необхідно описати низькорівневу частину керування. Для можливості використання програмного коду надалі автором було обрано мову програмування C.

Наступним етапом є створення моделі робототехнічної системи із модульних компонентів, що входять до складу бібліотеки готових рішень.

При додаванні однакових компонентів вони автоматично нумеруються у порядку зростання. Це дуже зручно при використанні компонентів робототехнічної системи з кількома однаковими модулями. Результат об'єднання чотирьох СТД у симетричну крокуючу роботизовану платформу представлений на рис. 6.

Наступним етапом проєктування є розробка алгоритму керування високого рівня. Для керування системою підходить будь-яка мова програмування за допомогою ROS [6–10].

Після розробки та дослідження алгоритму керування для віртуального прототипу СТД та віртуального прототипу роботизованої платформи можна перейти до заключної фази. Втілення натурної реалізації на основі результатів, отриманих під час роботи з віртуальним прототипом.

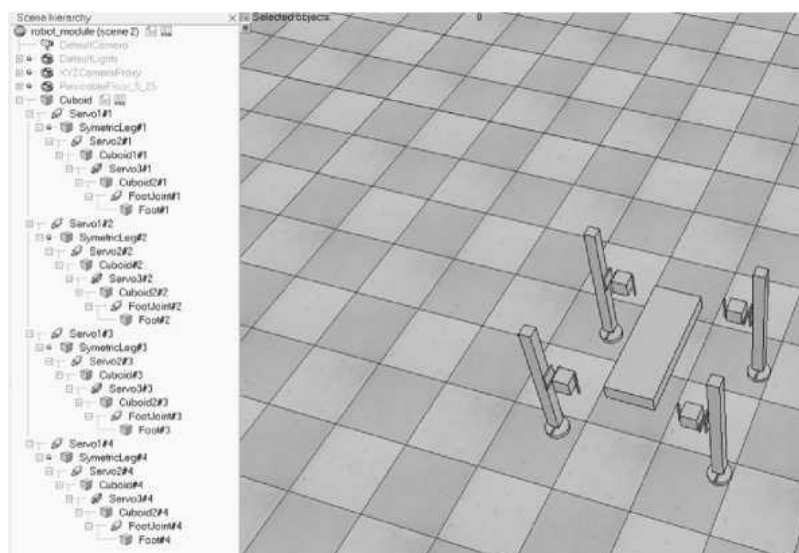


Рисунок 6 – Віртуальний прототип СШРП

Оскільки ROS забезпечує апаратну абстракцію, необхідно замінити лише програмний код вузла ROS, який підключається до пакету віртуального моделювання, бібліотекою для взаємодії з сервоприводами Dynamixel. MB ROS має драйвери для даних сервоприводів. За основу береться програмний код, розроблений для віртуального прототипу СТД.

**Висновки.** У цій роботі розглянуто можливі підходи до вирішення проблеми зниження трудомісткості розробки робототехнічних систем за одночасного підвищення її якості за допомогою створення системи віртуального прототипування робототехнічних об'єктів. Такі засоби дозволяють проводити експерименти з різними конфігураціями робототехнічних систем та алгоритмами їх управління у віртуальному середовищі з метою їх налагодження та оптимізації. Авторами були розроблені нові віртуальні прототипи компонентів робототехнічних систем, що становлять інтерес для спільноти розробників, та їх натурні реалізації.

Запропонований підхід дозволяє скоротити час, потрібний для розробки робототехнічної системи, знизити кваліфікаційні вимоги до розробників РТС, знизити трудомісткість розробки та дослідження нових робототехнічних компонентів, тим самим дозволяючи підвищити показники, що впливають на ефективність проектування.

#### Список використаних джерел

1. Юревич Е. И. Основы проектирования техники : учеб. пособие / Е. И. Юревич, А. В. Лопота. – Санкт-Петербург : Изд-во СПбГПУ, 2012. – 134 с.
2. Robotics, the traditional path and new approaches [Електронний ресурс], Вебсайт проекту Robohub. – URL: <https://robohub.org/robotics-the-traditional-path-and-new-approaches>
3. Ivaldi S., Padois V., Nori F. Tools for dynamics simulation of robots: a survey based on user feedback // IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots. – 2014. – С. 842–849.
4. GAZEBO [Електронний ресурс], Вебсайт проекту GAZEBO. – URL: <http://gazebo-sim.org/>
5. Watanabe, Thomio, Neves. The Rock-Gazebo Integration and a Real-Time AUV Simulation // LARS-SBR. – 2019. – С. 132–138.
6. Protopapadakis E., Stentoumis C., Doulamis N. AU-TONOMOUS ROBOTIC INSPECTION IN TUNNELS // Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – 2016. – no. 3.
7. ROS [Електронний ресурс], Вебсайт проекту ROS. – URL: <https://www.ros.org/>
8. ROS2 [Електронний ресурс], Вебсайт проекту ROS2. – URL: <https://index.ros.org/doc/ros2/>
9. YARP [Електронний ресурс], Вебсайт проекту YARP. – URL: <https://www.yarp.it/>
10. The multi-modal interface of Robot-Era multi-robot services tailored for the elderly / A. Di Nuovo, F. Broz, N. Wang, T. Belpaeme // Intel Serv Robotics. – 2018. – № 11. – С. 109–126.

УДК 629

Дячков А. П., Бабкін Г. В., к.т.н.

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв

## МОДЕЛЮВАННЯ ЗАСОБІВ КЕРУВАННЯ МОБІЛЬНИХ ОБ'ЄКТІВ ПРИ РУСІ У ВІРТУАЛЬНОМУ 3D-ПРОСТОРІ

Проектування та реалізація складних робототехнічних систем є довготривалими, трудомісткими та дорогими процесами. Рішення, які одержуються в результаті застосування звичних методів розробки, не завжди відповідають споконвічно заявленим вимогам, а іноді можуть бути зовсім не реалізовані на практиці через невизначеність параметрів функціонування системи чи середовища експлуатації.

Останнім часом зростає інтерес до створення єдиного технологічного процесу проектування та розробки робототехнічних систем на основі існуючих та застосовуваних окремо етапів реалізації вищезгаданих систем.

Перспективним напрямом у цій галузі є процес, у якому паралельно відбуваються розробка об'єкта управління та розробка системи управління. У цій роботі пропонується варіант реалізації програмної частини, що поєднує інструментальні засоби розробки об'єкта та його системи управління на етапі моделювання [1, 2].

**Мета роботи.** Зниження трудомісткості проектування складних робототехнічних систем із вбудованими пристроями управління шляхом розробки комплексу засобів САПР, що поєднує інструментальні засоби моделювання робототехнічного комплексу та моделювання вбудованих алгоритмів систем керування.

Завдання, які вирішуються у роботі:

- аналіз існуючих засобів моделювання робототехнічних об'єктів та систем управління;
- розробка бібліотеки моделей робототехнічного об'єкту;
- розробка бібліотеки алгоритмів нечіткого керування мобільним об'єктом;
- реалізація програмної частини, що поєднує інструментальні засоби моделювання робототехнічної системи та моделювання системи керування.

Робототехнічна система (РТС) являє собою сукупність роботів (робототехнічних об'єктів – РТО), автоматичних та/або автоматизованих пристроїв та іншого обладнання, інформаційно та функціонально пов'язаних між собою в єдине ціле. У цієї роботи під робототехнічною системою розумітиметься сукупність робототехнічного об'єкта управління та її системи керування.

Проектування та розробка будь-яких РТС є тривалим, трудомістким і дорогим процесом. Класична теорія автоматичного управління визначає конкретні етапи у процесі дослідження та синтезу РТС (рис. 1).



Рисунок 1 – Структура процесу дослідження та синтезу РТС

За структурою процесу видно, що він є ітераційним. Це дозволяє під час проєктування повертатися на попередні етапи, що дає можливість коригування моделі, виконання повторного синтезу системи управління або зміни поставленого раніше завдання в цілому. Також залежно від конкретної ситуації чи вимог, що пред'являються може змінюватися значимість кожного етапу проєктування. Найскладнішим у реалізації РТС є створення такої математичної моделі об'єкта управління, яка буде адекватна реальному об'єкту, що моделюється, і такої системи управління, яка буде відповідати заявленим вимогам і поставленому завданню.

Середовища розробки роботів стали відігравати все більш важливу роль у дослідженнях у галузі робототехніки в цілому і зокрема в розробці архітектур для мобільних роботів. На сьогоднішній день існує велика кількість програмних пакетів, що дозволяють моделювати та досліджувати роботу будь-яких РТС, а також вплив передбачуваного зовнішнього середовища експлуатації на неї. Будь-який пакет віртуального моделювання включає графічний і фізичний двигики.

Графічний движок (англ. graphics engine; система рендерингу чи «візуалізатор») – це проміжне програмне забезпечення (ППЗ). Його основним завданням є візуалізація (рендеринг) дво- чи тривимірної комп'ютерної графіки. Графічні двигуни можуть працювати як у реальному часі, так і витратити по кілька десятків годин на виведення одного зображення. Це залежить від того, який використовується процесор: графічний процесор відеокарти або центральний процесор.

До найвідоміших вільних графічних двигунів відносяться:

- OGRE – об'єктно-орієнтований графічний движок, написаний на C++. Движок є багатофункціональним, оскільки за його допомогою можна створювати ігри різних жанрів та інші додатки, не пов'язані з іграми. Підтримується рендеринг як через Direct3D9, і через OpenGL. Движок має досить потужне співтовариство підтримки, велику документацію та навчальні приклади на багатьох мовах;

- Irrlicht – графічний движок, який використовує можливості OpenGL і DirectX, написаний на C++;

- GLScene – OpenGL-орієнтований графічний движок для Delphi.

Фізичний движок (англ. physics engine) – програма чи підпрограма, яка здійснює моделювання фізичних законів реального світу у віртуальному просторі 3D-сцени із заданим ступенем точності. Сучасні фізичні двигики симулюють лише деякі закони фізики, проте, з часом і прогресу список «підтримуваних» законів збільшується. Зараз більшість фізичних двигунів можуть симулювати такі фізичні явища і стани: динаміку абсолютно твердого і деформованого тіла, динаміку рідин і газів, поведінку тканин і мотузок (троси, канати і т. д.) [4, 6, 7].

На практиці фізичний движок дозволяє наповнити віртуальний 3D-простір статичними і динамічними об'єктами – тілами (англ. body), вказати деякі загальні закони взаємодії тіл та середовища у просторі, наближені до фізичних, задаючи при цьому характер та ступінь взаємодій. Розрахунок взаємодії тіл між собою та з середовищем движок бере на себе, наближаючи фізичну модель отримуваної системи до реальної та передаючи уточнені геометричні дані в графічний движок. На рис. 2 показана схема взаємодії фізичного та графічного двигунів.

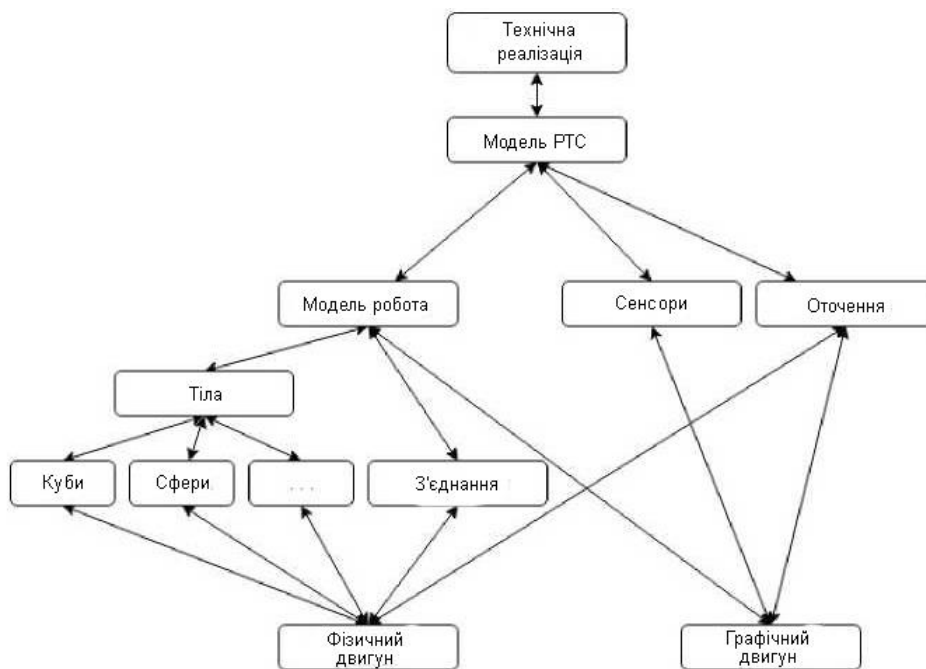


Рисунок 2 – Схема взаємодії фізичного та графічного двигунів

Пакети моделювання відрізняються своїми можливостями, які залежать від використовуваних у сукупності графічного та фізичного двигунів. Відповідно, від вибору середовища моделювання залежить, наскільки складну та реалістичну модель робота або цілої робототехнічної системи можна реалізувати [3].

Програмний пакет Gazebo [5] – симулятор з відкритим вихідним кодом розроблений компанією Open Source Robotics Foundation для моделювання роботи роботів в оточенні зовнішнього середовища. Програмний комплекс дозволяє тестувати алгоритми, проектувати роботів, проводити регресійне тестування та навчати систему штучного інтелекту з використанням реалістичних сценаріїв.

Gazebo має доступ до кількох високопродуктивних фізичних двигунів, включаючи ODE і Bullet. Це дозволяє імітувати кінематику та динаміку взаємодії об'єктів між собою та із середовищем експлуатації, а також отримувати та передавати правдоподібні показання з датчиків та інших пристроїв. А як графічний движок Gazebo використовує OGRE, що забезпечує реалістичну візуалізацію навколишнього середовища, включаючи освітлення, тіні та текстури. Завдяки зручним програмним та графічним інтерфейсам розробник може створити свою власну модель робота з використанням SDF формату XML, який описує об'єкти та середовища для симуляторів роботів, візуалізації та управління. Спочатку розроблений як частина робота-симулятора Gazebo, SDF був створений з урахуванням потреб наукових досліджень у галузі робототехніки. За минулі роки SDF став стабільним, надійним та розширюваним форматом, здатним описувати всі аспекти роботів, статичних та динамічних об'єктів, освітлення, місцевості та законів фізики. Також програмувати можна мовами C/C++ та Python. На даний момент Gazebo повноцінно розроблений тільки для Unix-подібних систем. Однак, розробники надають докладний опис для самостійного збирання пакета під Windows, а також розробляють готову повноцінну версію для даної операційної системи. Надається повністю безкоштовно.

У цій роботі як складніший приклад об'єкта керування щодо досліджень пропонується розглянути модель автономного ненаселеного підводного апарату (АНПА). Це з тим, що його середовище експлуатації динамічне, нестабільне і непередбачуване, і розв'язання завдань стабілізації керування у такій ситуації є цікавим дослідженням.

Для реалізації моделі АНПА так само, як і в попередньому прикладі, було створено опис моделі для пакета моделювання Gazebo, опис датчиків, опис контролерів для управління та плагінів для їх взаємодії. Віртуальний світ експлуатації даної моделі об'єкта – це модель водного простору (озеро, море, океан). Вода має фізичні властивості, відмінні від повітряного простору стандартно реалізованого в пакеті моделювання. Тому модель світу складається не тільки з компонентів, що описують візуальне уявлення світу, але й компонентів з описом взаємодій товщі води з об'єктами всередині неї та динамічних змін у просторі. На рис. 3 наведено модель об'єкта у середовищі моделювання [8–10].



Рисунок 3 – Модель АНПА у віртуальному світі, реалізована у пакеті моделювання Gazebo

На рис. 4 наведено процес навчання моделі АНПА досягненню заданої координати простору з виведенням інформації про прийняте рішення у консолі.

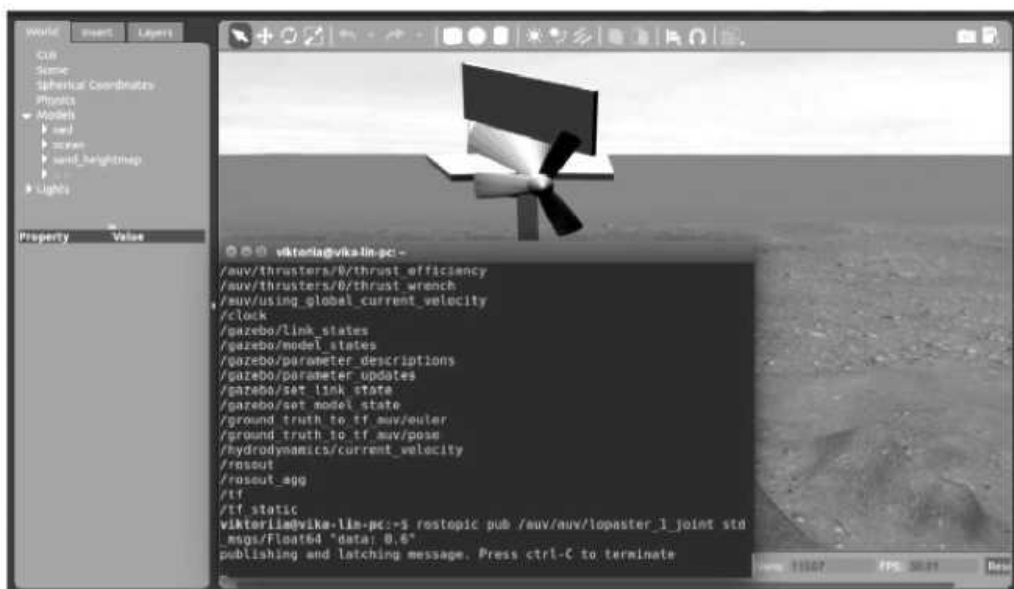


Рисунок 4 – Процес навчання моделі АНПА досягненню заданої мети

Реалізована модель об'єкта керування з вбудованою моделлю навченого агента як робоча область системи автономного керування є прикладом роботи, яка може стати як навчальним проектом, так і початковим етапом вдосконалення інших завдань у різних напрямках.

**Висновки.** У цій роботі вирішувалося завдання зниження трудомісткості процесу розробки робототехнічних систем з вбудованими алгоритмами систем управління шляхом розробки програмного забезпечення комплексного інструментального засобів моделювання робототехнічних систем і інструментальних засобів моделювання вбудованих алгоритмів систем управління, що параметризується. Окрім цього, результатом роботи стало розширення бібліотек готових рішень за рахунок реалізованих прикладів моделей об'єктів та моделей алгоритмів управління. Була розроблена навчальна модель чотириколісного робота з вбудованим алгоритмом управління, що працює у двокоординатній горизонтальній площині, та модель автономного безлюдного підводного апарату з вбудованим алгоритмом управління у тривимірному просторі на основі нечіткої логіки та навчання з підкріпленням.

З їхньою допомогою були проведені дослідження, що демонструють результативність та перспективність запропонованого підходу.

### Список літератури

1. Weeren A. Розробка Роботики Applications with MATLAB і Robotics System Toolbox. – MathWorks Benelux, 2015.
2. Yokoi K., Kanehiro F., Kaneko K. Honda Humanoid Robot Controlled by AIST Software // IEEEERAS. – 2001.
3. Zamora I., Lopez NG, Vilches VN Extending the OpenAI Gym for robotics: a toolkit для reinforcement навчання шляхом використання ROS і Gazebo. – 2016.
4. GLScene [Електронний ресурс], Веб-сайт проекту GLScene. – URL: <http://glscene.sourceforge.net/wikka/>.
5. Gazebo [Електронний ресурс], Веб-сайт проекту Gazebo. – URL: <http://gazebosim.org>.
6. Gutierrez C., San Juan L. Towards distributed and real-time framework для robots: Evaluation of ROS 2.0 communications for real-time robotic applications // Erie Robotics SL. – 2018.
7. ROS2 [Електронний ресурс], Веб-сайт проекту ROS. – URL: <https://design.ros2.org/>.
8. SDF [Електронний ресурс], Веб-сайт проекту SDF. – URL: <http://sdformat.org>.
9. Safeea M., Neto P. Human-robot Колісія озброєння для Industrial Robots: A V-REP заснований Solution // TE2018. – 2018. – № 25. – С. 81–86.
10. Spica R., Claudio G., Spindler G. Interfacing Matlab/Simulink with V-REP для Easy Development of Sensor-Based Control Algorithms for Robotic Platforms // Conf. Workshop on Robotics and Automation on MATLAB/Simulink for Robotics Education and Research. 2014.

УДК 629.5.015.4:681.5:519.21

Демідов І. А.

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв

## СТОХАСТИЧНА НЕПЕРЕДБАЧУВАНІСТЬ КУРСУ МРО ЯК ЗАСІБ ПРОТИДІЇ ПРОГНОЗНОМУ СПОСТЕРЕЖЕННЮ

Сучасні автономні морські рухомі об'єкти (МРО) відіграють ключову роль у військових, пошуково-рятувальних та моніторингових операціях, де від надійності їхнього руху й здатності залишатися непоміченими або непередбачуваними залежить успішність виконання завдання. Розвиток засобів технічного спостереження та систем прогнозного відстеження призводить до того, що будь-яка детермінована або навіть слабкошумна траєкторія руху МРО може бути перехоплена алгоритмами машинного навчання або сучасними фільтрами стану, що використовуються противником. Це особливо актуально у військовому секторі, де спостерігач часто має доступ до багаторазових вимірів та може застосовувати адаптивні чи ансамблеві методи прогнозування майбутнього положення МРО [4].

Сучасні дослідження орієнтовані переважно на підвищення передбачуваності та стабільності морських об'єктів у присутності зовнішніх збурень. Так, у роботах з робастного керування безпілотними надводними платформами досліджуються методики компенсації невизначеностей середовища (вітру, хвиль, течій) та мінімізації шумів у системі навігації [1, 2]. У межах цих підходів збурення розглядаються як такі, що заважають руху, а отже, система керування прагне їх максимально нівелювати. Аналогічний акцент робиться й у класичних працях з морської динаміки, де детально описуються методи стабілізації траєкторії та демпфування стохастичних відхилень [5].

У той же час у сфері оборонних застосувань така тенденція до детермінованості може становити ризик, адже передбачувана траєкторія або навіть статистично стабільний рух значно спрощують завдання спостерігача-противника. Використання сучасних методів прогнозування, таких як ансамблеві нейронні мережі для ймовірного передбачення маневру судна, дозволяє точно оцінювати подальшу траєкторію об'єкта навіть у випадку наявності шумів низької інтенсивності [4]. Тому здатність МРО навмисно створювати непередбачувані відхилення, що унеможливають прогнозування подальших координат навіть у короткому горизонті часу, набуває стратегічної важливості.

Створення таких непередбачуваних траєкторій вимагає адекватного моделювання шумів. У роботах Тимченка розглядаються моделі гауссового та нормально розподіленого шуму як базових елементів стохастичної структури руху морських об'єктів, придатних для моделювання природних та техногенних відхилень [3]. Крім того, для моделювання рідкісних, але суттєвих маневрів, характерних для руху у складних умовах або на мілководді, може бути використаний пуассонівський шум, який представляє собою модель випадкових імпульсних збурень [3]. На противагу моделям компенсації шумів, у даному дослідженні ці ж стохастичні механізми використовуються як інструмент посилення непередбачуваності, а не як фактори, що мають бути подавлені.

Таким чином, наукова актуальність проблеми полягає у необхідності переходу від класичної парадигми «передбачуваного та стабілізованого руху» до парадигми керованої непередбачуваності, яка дозволяє МРО уникати детектування або прогнозування сторонніми спостерігачами. Враховуючи стрімкий розвиток систем автоматичного цілевказування та прогнозування траєкторій, здатність МРО генерувати стохастично складні, частково хаотичні, але контрольовані курсові відхилення (наприклад, у межах  $\pm 10^\circ$ ) стає критично важливою для забезпечення тактичної переваги та підвищення живучості автономних систем у військових операціях [1–5].

**Метою даного дослідження** є розробка та формалізація підходу до створення керованої непередбачуваності руху автономного морського рухомого об'єкта (МРО) з курсовими відхиленнями до  $\pm 10^\circ$  при слідуванні за заданою траєкторією. Поставлена мета передбачає синтез стохастичної компоненти руху, яка одночасно:

- не порушує загального напрямку руху МРО та дозволяє зберігати робастну стабільність у межах динамічної системи;
- створює такі флуктуації курсу, які роблять неможливим точне прогнозування положення МРО у короткостроковому горизонті для будь-якого стороннього спостерігача;
- включає у модель шумові механізми різної природи (гауссовий, нормальний та пуассонівський шум), які у комплексі забезпечують нелінійну, статистично складну поведінку;
- дозволяє оцінити межі можливостей моделей прогнозування траєкторій, включно з ансамблевими нейронними системами, які у сучасних роботах демонструють дуже високий рівень точності [4].

Таким чином, мета полягає не лише у створенні стохастичного збурення, а й у побудові системи цілеспрямованої непередбачуваності, що має практичну цінність для військових морських платформ та автономних роботизованих систем, які можуть діяти в умовах активного спостереження противника.

Запропонована методика ґрунтується на введенні контрольованої стохастичної непередбачуваності курсу МРО. Метою є унеможливлення точного прогнозування наступного положення МРО зовнішнім спостерігачем при одночасному збереженні стабільності руху та виконанні загальної траєкторії.

Для моделювання випадкових відхилень курсу застосовуються три типи шумових процесів:

- 1) гауссовський шум – часті, малі відхилення, що створюють «тремтіння» курсу;
- 2) пуассонівський шум – поодинокі, різкі та значні маневри, властиві раптовим тактичним змінам;
- 3) комбінований шум – синтез двох попередніх, який забезпечує максимальну непередбачуваність і руйнує фіксовані закономірності у русі.

Усі стохастичні компоненти обмежуються фізично допустимим розкидом курсу  $\pm 10^\circ$ , що дозволяє гарантувати робастну стабільність контролера, не порушувати виконання глобального маршруту та водночас повністю унеможливлювати прогноз наступної точки руху на короткому горизонті.

Таким чином, МРО рухається по загальному напрямку, але кожний локальний сегмент траєкторії є слабко корельованим із попереднім, що різко ускладнює роботу спостерігача-противника.

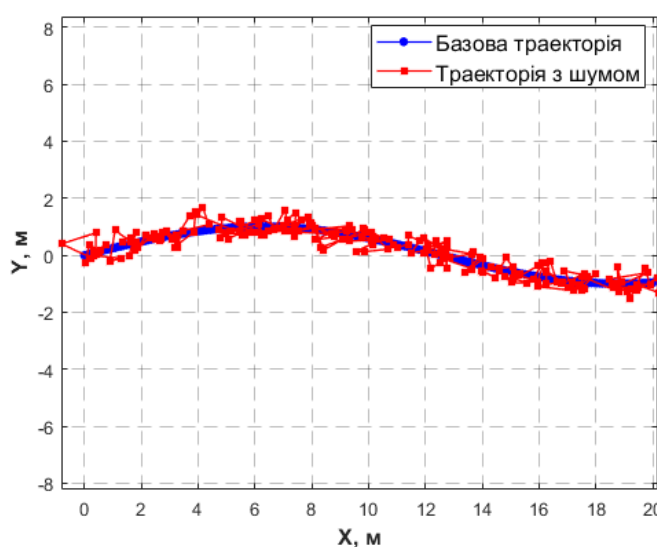


Рисунок 1 – Приклад непередбачуваного курсу із комбінованим гауссово-пуассонівським шумом  $\pm 10^\circ$

**Висновки.** Проведене дослідження продемонструвало необхідність переходу від традиційної парадигми стабілізації руху морських автономних платформ до концепції керованої непередбачуваності, що формує принципово новий підхід до забезпечення живучості й тактичної надійності МРО у військових та спеціальних операціях. На відміну від класичних робіт, орієнтованих на мінімізацію збурень середовища та демпфування стохастичних відхилень, запропонована модель розглядає шум не як негативний фактор, а як елемент тактичної поведінки, що навмисно ускладнює можливість прогнозування подальшого курсу руху.

Розроблена стохастична модель, що включає гауссовий шум для частих невеликих коливань та пуассонівські імпульсні відхилення для моделювання раптових маневрів, дозволяє формувати курсову траєкторію з обмеженим діапазоном відхилень до  $\pm 10^\circ$ , яка зберігає макрорівневу стабільність, але порушує локальну передбачуваність руху. Таке поєднання шумових механізмів створює нелінійну, частково хаотичну структуру руху, на яку складно застосувати методи прогнозування навіть за наявності багаторазових вимірів положення МРО. Особливо важливим є те, що комбінований шум формує слабко корельовані послідовності відхилень, які істотно знижують ефективність адаптивних фільтрів стану та ансамблевих нейронних моделей, що сьогодні є основними інструментами прогнозування майбутньої траєкторії автономних об'єктів.

Отримані результати підтверджують, що введення контрольованої непередбачуваності може слугувати ефективним способом протидії алгоритмам моніторингу й відстеження, які широко застосовуються у військовій сфері. Траєкторії, сформовані методом стохастичного комбінування шумів, суттєво підвищують складність побудови короткострокових прогнозів, що створює додатковий захисний рівень проти систем наведення, аналізу руху та машинного навчання. Це свідчить про потенційну практичну цінність моделі при розробці нових класів автономних морських платформ, здатних діяти в умовах активного спостереження та загрози перехоплення.

### Список використаних джерел

1. Fossen T. I. Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control. – Chichester: Wiley, 2011. – 720 p.
2. Healey A. J., Lienard D. Multivariable sliding-mode control for autonomous diving and steering of unmanned underwater vehicles // IEEE Journal of Oceanic Engineering. – 1993. – Vol. 18, № 3. – P. 327–339.
3. Тимченко В. І. Стохастичні моделі та процеси в навігації морських рухомих об'єктів. – Одеса : ОНМА, 2008. – 312 с.
4. Bishop C. M. Pattern Recognition and Machine Learning. – New York: Springer, 2006. – 738 p.
5. Sørensen A. J. Marine Control Systems: Propulsion and Motion Control of Ships and Ocean Structures. – Trondheim: NTNU, 2018. – 256 p.

УДК 621.3.049

Пустомельник В. С., Дьяконов О. С., к.т.н.

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв

## РОЗРОБКА НАВАНТАЖЕННЯ ЗМІННОГО СТРУМУ З МІКРОПРОЦЕСОРНИМ КЕРУВАННЯМ

Регульовані RLC-навантаження змінного струму (резистивно-індуктивно-ємнісні) широко застосовуються у випробуваннях, налаштуванні та моделюванні електричних систем. Зазначено, що дані навантаження можуть бути використані при випробуванні:

- джерел живлення та інверторів;
- джерел безперебійного живлення (UPS);
- генераторів та систем автоматичного регулювання напруги (AVR);
- побутової та промислової апаратури.

Крім того регульовані навантаження змінного струму можуть бути у складі:

- лабораторних стендів та навчальних установок;
- стендів для калібрування та перевірки вимірювального обладнання;
- лабораторних стендів для дослідження систем електроприводу.

**Метою даної роботи** є розробка керованого RLC-навантаження змінного струму лабораторного призначення потужністю до 2 кВА.

### Огляд існуючих прототипів

Серед існуючих на ринку прототипів керованих навантажень потужністю до 2 кВА можна виділити прилади двох класів:

- універсальні навантаження постійного та змінного струму, наприклад, Chroma 63802 (рис. 1, а) та IT8615L(G) (рис. 1, б);
- керовані банки RLC-навантажень загального призначення (рис. 2).



а



б

Рисунок 1 – Програмовані електронні навантаження змінного/змінно-постійного струму:  
а – Chroma 63802, б – IT8615L(G)

Прилади першого класу, як правило, підтримують широкий спектр режимів [1, 2], а саме:

- режими CC/CR/CP для електронного навантаження постійного струму;
- режими CC/CR/CP/CV для електронного навантаження змінного струму.

Також ці навантаження дозволяють здійснювати оперативне вимірювання параметрів навантаження:

- вимірювання  $V_{rms}$ ,  $V_{pk}$ ,  $V_{dc}$ ,  $I_{rms}$ ,  $I_{pk}$ ,  $I_{dc}$ ,  $W$ ,  $VA$ ,  $VAR$ ,  $CF$  (crest factor),  $PF$  та  $FREQ$ ;
- відображення на екрані кривих струму та напруги (режим осцилографа);
- здійснення FFT-аналізу кривих струму та напруги.

Навантаження також реалізують функції захисту  $OT$ ,  $OC$ ,  $OV$ ,  $UV$  та  $OP$  та мають інтерфейси зв'язку для інтеграції у лабораторні вимірювальні комплекси.



Рисунок 2 – Зовнішній вигляд регульованого однофазного RLC-навантаження AC115 V-2 kW-RLC [3]

Прилади другого класу (див. рис. 2) дозволяють здійснювати ступінчате регулювання параметрів навантаження. При цьому керування, як правило, здійснюється вручну. Такі навантаження мають захист від перегріву резистивних компонентів, короткого замикання та тривалого перевантаження.

#### Вибір стратегії комутації RLC-компонентів

Припустимо, що нам необхідно комутувати банк резистивного навантаження в діапазоні провідності  $0 - 9G$ . Найпростіша схемотехнічна реалізація – це використання дев'яти резисторів номіналом  $1G$ . При цьому кожен резистор комутується окремим силовим ключем. Серед переваг такого підходу – це ступінчата зміна провідності без проміжного стану комутації, тобто в момент зміни  $G$  стан змінює тільки один силовий вентиль. Недоліком цього підходу є перевитрата резистивних компонентів та силових вентилів.

Розглянемо іншу схему комутації з меншою кількістю резистивних компонентів (рис. 3).

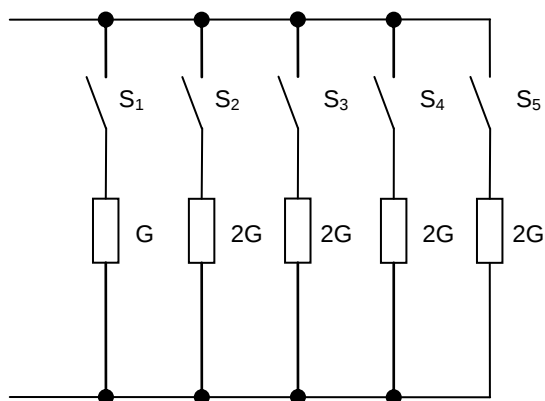


Рисунок 3 – Схема комутації резистивних елементів

Як бачимо з таблиці комутації (табл. 1), при збільшенні номера комбінації з 0 до 9 безпечними (змінюється стан тільки одного вентиля) є переходи  $0 \rightarrow 1$ ,  $2 \rightarrow 3$ ,  $4 \rightarrow 5$ ,  $8 \rightarrow 9$ . Таким чином, якщо для цієї схеми використовувати звичайні реле, то при перемиканні між сусідніми комбінаціями будемо мати паразитні комутації, наприклад, перехід  $1 \rightarrow 2$  може відбутися за сценарієм  $G \rightarrow 0 \rightarrow 2G$  чи  $G \rightarrow 3G \rightarrow 2G$ . Для плавного збільшення / зменшення навантаження це не припустимо.

Таблиця 1 – Таблиця комутації силових клапанів

| Номер комбінації | Стан клапана   |                |                |                |                | Сумарна провідність |
|------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|---------------------|
|                  | S <sub>1</sub> | S <sub>2</sub> | S <sub>3</sub> | S <sub>4</sub> | S <sub>5</sub> |                     |
| 0                |                |                |                |                |                | 0                   |
| 1                | x              |                |                |                |                | G                   |
| 2                |                | x              |                |                |                | 2G                  |
| 3                | x              | x              |                |                |                | 3G                  |
| 4                |                | x              | x              |                |                | 4G                  |
| 5                | x              | x              | x              |                |                | 5G                  |
| 6                |                | x              | x              | x              |                | 6G                  |
| 7                | x              | x              | x              | x              |                | 7G                  |
| 8                |                | x              | x              | x              | x              | 8G                  |
| 9                | x              | x              | x              | x              | x              | 9G                  |

Вирішити цю проблему може синхронна комутація клапанів при переході кривої струму навантаження через нуль. В такому випадку у якості силових клапанів використовуються транзистори MOSFET, включені по схемі back-to-back (рис. 4).

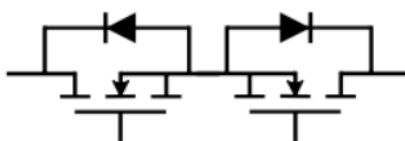


Рисунок 4 – Підключення MOSFET по схемі back-to-back

Нагадаємо, що конфігурація MOSFET back-to-back використовує два MOSFET-транзистори, з'єднані послідовно, з витоками, спрямованими один до одного, для створення двонаправленого перемикача, який блокує зворотний струм. Ця схема долає обмеження одного MOSFET-транзистора, який має власний діод, що проводить струм в одному напрямку, шляхом використання двох MOSFET-транзисторів, з'єднаних послідовно. Один MOSFET керує струмом в одному напрямку, блокуючи зворотний струм, а інший MOSFET керує струмом у протилежному напрямку.

На рис. 5 зображена принципова схема детектору переходу через нуль мережевої напруги [4].

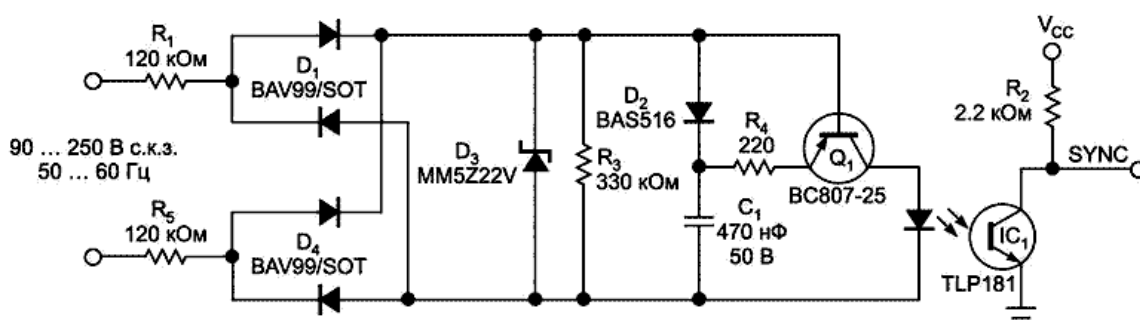


Рисунок 5 – Детектор переходу через нуль

Дана схема містить мінімальну кількість високовольтних компонентів та забезпечує гальванічну розв'язку. Детектор формує короткий імпульс при переході напруги через нуль. Імпульс виникає приблизно за 200 мкс до перетину нуля. Оскільки імпульс генерується тільки тоді, коли вхідна напруга мережі близько до нуля, споживана схемою потужність невелика і становить близько 200 мВт при вхідній напрузі 230/50 Гц.

Конденсатор C1 заряджається до 22 В – рівня обмеження стабілітрона D3. Вхідний струм обмежується резисторами R1 та R5. Коли випрямлена вхідна напруга опускається нижче напруги на конденсаторі C1, відкривається транзистор Q1 і генерує імпульс тривалістю кілька сотень мікросекунд. Оптопара IC1 загострює фронти і робить вихідний імпульс прямокутнішим. Вимоги до R1 та R5 визначаються середньоквадратичним значенням вхідної напруги.

Вхідна напруга схеми ділиться порівну між резисторами R1 і R5, так що номінальна вхідна напруга дорівнюватиме 400 В – цілком достатньо для роботи в мережі 230 В. Більше жодного високовольтного компонента

для схеми не потрібно. Зазначимо тільки, що стабілітрон D3 з номінальною напругою стабілізації 22 В може пробиватися при напрузі до 30 В, у зв'язку з чим робочу напругу конденсатора 470 нФ (C1) треба вибирати із запасом, скажімо 50 В. І переважно, щоб C1 був керамічним, оскільки керамічні надійніше електролітичних, алюмінієвих або танталових, особливо при підвищених температурах.

Резистор R4 обмежує піковий струм світлодіода оптопар. Первинне обмеження струму відбувається за рахунок плавного нахилу випрямленої змінної напруги, що не дозволяє Q1 генерувати піки струму в той час, коли він розряджає конденсатор C1.

Результат моделювання схеми в пакеті LTspice представлено на рис. 6.

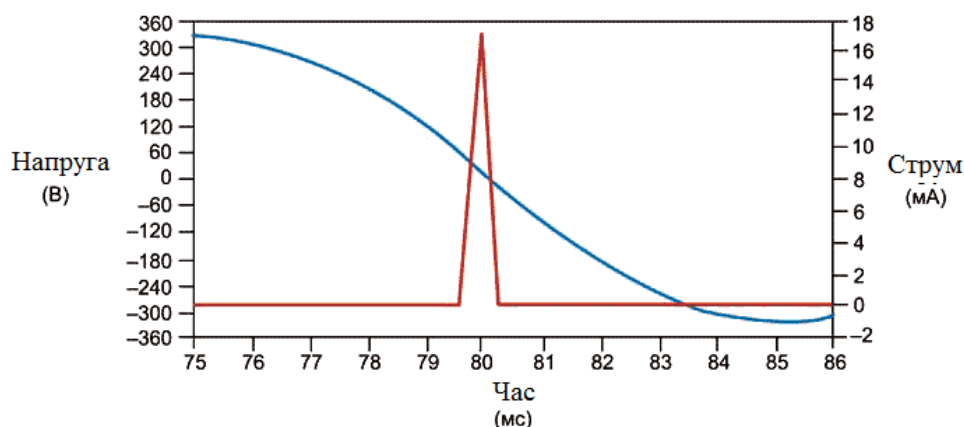


Рисунок 6 – Результат моделювання схеми детектора в LTspice

При входній напрузі 230 В/50 Гц піковий струм світлодіода оптопарі дорівнює 17 мА. Модель демонструє хороші результати в діапазоні мережевих напруг від 90 до 250 при частоті як 50, так і 60 Гц. У мережі 110 В/60 Гц піковий струм через світлодіод дорівнює 8.5 мА, для роботи IC1 цього ще достатньо. Для збільшення струму світлодіода треба зменшити опір R3 або збільшити ємність конденсатора C1.

Тестування реальної схеми продемонструвало гарний збіг із моделлю (рис. 7).

#### Вибір елементної бази

Припустимо, що нам треба комутувати ланку з навантаженням потужність  $S = 100 \text{ VA}$  при напрузі змінного струму  $U = 230 \text{ V}$ . При цих умовах маємо пікове значення напруги 325 В та середньоквадратичний струм навантаження  $I = S/U = 0.43 \text{ A}$ .

Для типового перемикачання 230 В змінного струму (пік  $\approx 325 \text{ V}$ ) зазвичай достатньо MOSFET на 650 В. Якщо потрібне дуже швидке перемикачання, робота за високих температур або стійкість до перехідних процесів, можна розглянути MOSFET на 1200 В SiC (Microchip, ST, Vishay). Вони мають вищу вартість, але значно кращу поведінку перемикачання та стійкість до перехідних процесів.

Зазначимо, що при середньоквадратичному струмі лише  $\sim 0.44 \text{ A}$ , майже будь-яка з деталей на 800 В буде сильно переоцінена на провідність, але при цьому слід перевірити втрати на перемикачання,  $R_{DS(on)}$  при вибраній напрузі затвора та енергію лавини у випадку перемикачання індуктивних навантажень.

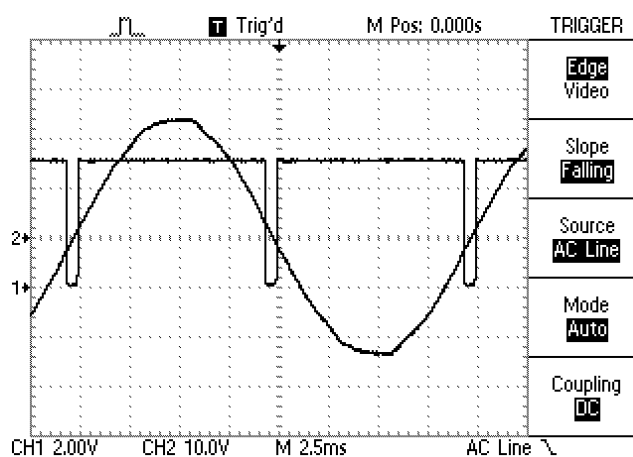


Рисунок 7 – Результати тестування реальної схеми

Підходящими транзисторами є N-канальний MOSFET 2SK3673-01MR з максимальною напругою сток-виток 700 В чи 2SK2611 з  $U_{св\ max} = 900\ В$ .

На рис. 8 наведена принципова схема керування транзисторами.

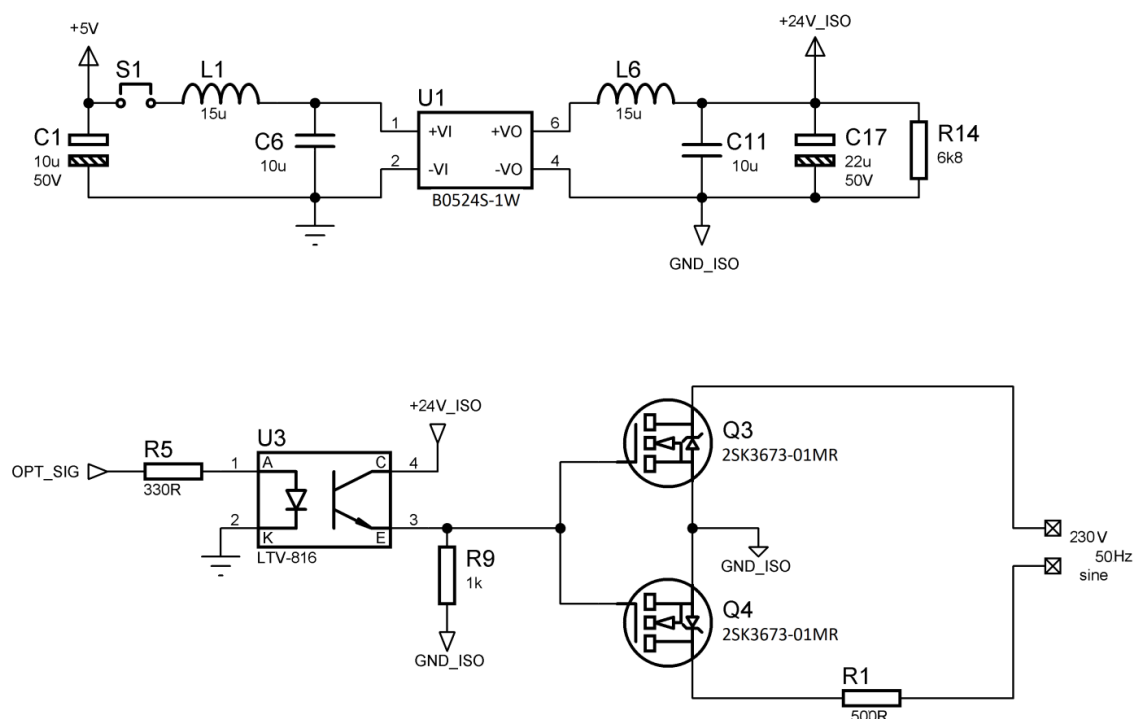


Рисунок 8 – Схема керування транзисторними ключами

Для забезпечення гальванічної розв'язки по живленню використовується DC-DC перетворювач U1 B0524S-1W потужністю 1 W. Гальванічна розв'язка по сигналу керування з мікроконтролеру здійснюється транзисторною оптопарою U3 LTV-816.

**Висновок.** У даній роботі запропонована стратегія комутації ланок банку навантаження змінного струму. Для плавного перемикавання ланок навантаження використовуються електронні ключі на основі схеми двох MOSFET-транзисторів, включених back-to-back. Моменти комутації ланок відбуваються при переході кривої струму через нуль. Для синхронізації мікроконтролерної системи керування транзисторами з напругою, що прикладена до навантаження, використовується детектор переходу через нуль. Потрібний фазовий зсув розраховується мікроконтролером в залежності від типу навантаження (R, L чи C).

#### Список використаних джерел

1. Chroma 63802 Datasheet. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.testequipmenthq.com/datasheets/CHROMA-63802-Datasheet.pdf>.
2. Programmable AC/DC Electronic Load. User Manual for IT8600 Series. Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.itechate.com/uploadfiles/%E7%94%A8%E6%88%B7%E6%89%8B%E5%86%8C/user%20manual/it8600/IT8600%20User%20Manual-EN.pdf>.
3. AC115V-2KW-RLC load bank. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.vilva.net/en/index.php?c=product&id=154>.
4. Demchenko, Peter, «Improved optocoupler circuits reduce current draw, resist LED aging» EDN, Dec. 14, 2007, P. 60.

УДК 629.08

Грешнов А. Ю., Стократян В. В.

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв

## ПЕРЕСУВНИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ПАЛИВНИХ РЕЧОВИН

Актуальність підвищення якості палива, а також постійний його контроль є пріоритетним державним завданням. По-перше, палива та мастильні матеріали дуже високої якості виробляють і споживають у даний час у все зростаючих обсягах. У зв'язку з цим науково-технічне та економічне обґрунтування вимог до якості палив і мастильних матеріалів (ПММ), оптимізація рівня кожної з їх експлуатаційної властивості та вибір технології для досягнення цього рівня стали такими проблемами, які обумовлені витрачанням великих матеріальних засобів. Так, використання ПММ з необґрунтованим запасом якості призводить до нераціональних витрат у нафтопереробній промисловості, а споживання палива та мастильних матеріалів, що не відповідають вимогам до умов експлуатації призводить до зниження надійності двигунів, машин і механізмів. Це веде до втрат та відмови техніки, яка потребує значних коштів та часу на їх відновлення. По-друге, з ускладненням конструкції двигунів, збільшенням їх потужності та теплонапруженості підвищилися вимоги до якості ПММ. У зв'язку з цим почали створювати нові марки паливно-мастильних матеріалів. У нафтопереробній та хімічній промисловості з'явилися відповідні технологічні та ресурсні проблеми. Не менш складними виявилися проблеми і у експлуатаційників: як забезпечити надійність і ефективність роботи двигунів у конкретних, часто екстремальних умовах їх експлуатації [1].

Таким чином, правильне та своєчасне визначення оптимального рівня якості ПММ на тлі безперервного зростання їх споживання в Україні, набуває важливе економічне й, навіть, політичне значення. Використання нафтопродуктів з великим запасом якості, ніж це потрібно для даного двигуна призводить до нераціональних їх витрат. У той ж час застосування ПММ, що не відповідають вимогам умов експлуатації, знижує надійність техніки. Навіть незначні неточності у визначенні оптимальних значень показників якості можуть бути причиною загрози величезних збитків.

Дана робота направлена на розв'язання питання удосконалення якості визначення показників ПММ, які використовуються при експлуатації. Це пропонується зробити за рахунок обґрунтування необхідності включення до складу науково-виробничий центр метрології, стандартизації та сертифікації мобільних лабораторій випробування та визначення якісних характеристик паливно-мастильних матеріалів (МЛППМ) за європейським стандартом ISO/IEC 17025:2006 [2], який призначений для визначення показників ПММ.

Для комплектування лабораторії засобами вимірювальної техніки для проведення випробування та визначення якісних характеристик паливно-мастильних матеріалів треба визначити, які саме завдання стоять перед лабораторією та якими силами і в яких умовах вони будуть виконуватись [3].

Для забезпечення якості діяльності існуючих вимірювальних лабораторій ПММ під час виконання вимірювань пов'язаних з визначенням фізико-хімічних, фізико-механічних та інших властивостей і показників паливно-мастильних матеріалів та спеціальних рідин у об'ємі повного аналізу, слід визначити оптимальний склад технічних засобів, які призначені для контролю якості паливно-мастильних матеріалів. На підставі проведеного аналізу, щодо об'єму виконання робіт (галузі акредитації відповідних органів) і робіт, що передбачаються у недалекому майбутньому та пов'язані з новими вимогами до пального, що висуваються, складемо відповідну таблицю [4], яка буде стосуватися комплектування мобільних лабораторій випробування та визначення якісних характеристик паливно-мастильних матеріалів (МЛППМ), спроможних виконувати не менше, як 25 стандартних методів випробувань.

Таблиця – Визначення оптимального складу технічних засобів, які призначені для контролю якості паливно-мастильних матеріалів

| № з/п | Найменування технічних засобів                               | Одиниця виміру | Кількість засобів |
|-------|--------------------------------------------------------------|----------------|-------------------|
| 1     | 2                                                            | 3              | 4                 |
| 1     | Апарат для розгону нафтопродуктів                            | шт             | 2                 |
| 2     | Термостат для визначення кінематичної в'язкості рідин        | шт             | 2                 |
| 3     | Апарат для визначення температури спалаху в закритому тиглі  | шт             | 1                 |
| 4     | Апарат для визначення температури спалаху у відкритому тиглі | шт             | 1                 |
| 5     | Термостат для визначення щільності нафтопродуктів            | шт             | 1                 |

Продовження таблиці

| 1  | 2                                                                                | 3  | 4  |
|----|----------------------------------------------------------------------------------|----|----|
| 6  | Прилад для визначення питомої електропровідності вуглеводневих рідин             | шт | 1  |
| 7  | Кулонометричний титратор                                                         | шт | 1  |
| 8  | Рефрактометр типу ІРФ                                                            | шт | 1  |
| 9  | Прилад для визначення фактичних смол типу ПОС                                    | шт | 1  |
| 10 | Апарат для визначення вмісту смол випарюванням струменем                         | шт | 1  |
| 11 | Іономір лабораторний                                                             | шт | 1  |
| 12 | Установка для визначення температури помутніння і початку кристалізації типу ЛТЗ | шт | 1  |
| 13 | Пробовідбірник переносний для нафтопродуктів                                     | шт | 1  |
| 14 | Ваги електронні лабораторні                                                      | шт | 1  |
| 15 | Барометр-анероїд                                                                 | шт | 1  |
| 16 | Аквадистилятор електричний                                                       | шт | 1  |
| 17 | Електроплитка із закритою спіраллю                                               | шт | 1  |
| 18 | Шафа сушильна (лабораторна електропіч)                                           | шт | 1  |
| 19 | Секундомір механічний                                                            | шт | 6  |
| 20 | Штатив лабораторний                                                              | шт | 15 |
| 21 | Витратомір (ротаметр)                                                            | шт | 1  |
| 22 | Циліндри для ареометрів в будь-якому виконанні                                   | шт | 8  |
| 23 | Воронка ділильна в будь-якому виконанні                                          | шт | 4  |
| 24 | Колба для перегонки типу КРН                                                     | шт | 10 |

У вище наведеній таблиці приведений орієнтовний перелік технічних засобів, за допомогою яких МЛПММ науково-виробничих центрів метрології, стандартизації та сертифікації можуть виконувати завдання за призначенням, як у стаціонарних умовах, так і на виїзді.

Якщо більш детально провести аналіз роботи на засоби повірки (калібрування) технічних засобів вимірювання, що використовуються у науково-виробничих центрах метрології, стандартизації та сертифікації з визначення якості ПММ [5], то з'являється можливість визначити перелік робочих еталонів, засобів вимірювання та допоміжного обладнання, за допомогою якого можливо провести комплектування робочого місця у складі мобільних лабораторій випробування та визначення якісних характеристик паливно-мастильних матеріалів. Якщо заздалегідь планувати роботи та комплектувати мобільну лабораторію в залежності від потреб з визначенням номенклатури ЗВТ, то цілком можливо проводити розміщення повірочного (калібрувального) обладнання на базі автотранспорту у спеціально обладнаних місцях. Треба зауважити, що перспективні вимірювальні комплекси, які вже експлуатуються в провідних країнах світу та з часом можуть бути закупленими чи побудованими вітчизняними підприємствами, мають модульний принцип побудови та можливість проводити перебудову робочих місць в залежності від поставлених завдань [6]. Все це дає можливість за наявності необхідних технічних засобів проводити 100 % метрологічне обслуговування будь-яких лабораторій у тому числі й тих які проводять визначення якості ПММ.

Останнім часом, коли між виробниками та торговими мережами, що займаються ПММ, спостерігається жорстка конкуренція і якість нафтопродуктів набуває первинне значення, на ринку з'являються нові мобільні лабораторії випробування та визначення якісних характеристик паливно-мастильних матеріалів [7], які обладнані сучасними технічними засобами що здатні проводити повний обсяг робіт з визначення якості ПММ в короткий проміжок часу (експрес контроль).

Мобільні лабораторії випробування та визначення якісних характеристик паливно-мастильних матеріалів проводять перевірку якості пального та інших рідин з можливістю виявлення некондиційних проб. Такі міні лабораторії містять найсучасніше обладнання.

Щодо завдань, які можливо ставити перед такими сучасними комплексами, треба визначити [8]:

- мобільні лабораторії випробування та визначення якісних характеристик паливно-мастильних матеріалів моніторинг якості пального та інших рідин безпосередньо на АЗС, станціях видачі пального, нафтобазах, терміналах і складах пального та інших об'єктах з виїздом спеціально підготовленого персоналу безпосередньо на місце проведення перевірки;
- виявлення фактів невідповідності якості нафтопродуктів прийнятим стандартам до підтвердження виявленого факту у стаціонарних акредитованих лабораторіях;
- мобільні лабораторії сконструйовані за принципом набору тільки експрес методів аналізу якості нафтопродуктів що дає можливість виконання великої кількості визначень якості нафтопродуктів і відбору на подальше випробування тільки тих, які дійсно некондиційні;
- кількісне визначення вмісту оксигенатів, ароматичних вуглеводнів і бензолу, олефінів та граничних вуглеводнів у автомобільному бензині;

- точний розрахунок октанового числа по моторному і дослідницькому методу;
- точний розрахунок цетанового числа;
- визначення фракційного складу властивостей палива експрес-методом;
- визначення щільності палива;
- експрес вимірювання температури спалаху в закритому і відкритому тиглі експрес-методом;
- визначення тиску насичених парів нафтопродуктів розрахунковим методом;
- якісне визначення водорозчинних кислот і лугів;
- оцінка основної відносної похибки паливороздавальних колонок під час відпуску нафтопродуктів;
- дотримання умов для зберігання проб нафтопродуктів відповідно до вимог з ДСТУ 4488:2005 на час їх транспортування до стаціонарної акредитованої лабораторії по дослідженню нафтопродуктів;
- відбір проб для подальшого проведення контрольних та арбітражних аналізів: зберігання/упаковка/маркування.

Сучасне автоматизоване обладнання мінімізує людський фактор і відповідає всім сучасним вимогам. Один експрес-аналізатор може зробити аналіз, для якого у стаціонарній лабораторії знадобиться понад 5 приладів [9]. В Україні вже приватні компанії (ПАТ «Концерн Галнафтогаз»-ОККО, ТОВ «Золотий екватор»-WOG) використовуються мобільні лабораторії TFC, які пройшли акредитацію за європейським стандартом ISO/IEC 17025: 2006 «Загальні вимоги до компетентності випробувальних і калібрувальних лабораторій» та оснащені технічним обладнанням, яке забезпечує високу точність вимірювань [10]. За комплектацією вищезазначених лабораторій, особливо слід відмітити наступне технічне обладнання:

- Miniscan IR Vision (Gasoline Diesel, PRO) – компактний високошвидкісний автоматичний FTIR аналізатор бензина, реактивного і дизельного палива (понад 100 параметрів палива);
- Multi EA3100 – прилад, що визначає вміст сірки у нафтопродуктах арбітражним методом для Євро-5;
- Експрес-аналізатор MiniscanIRXpert австрійської фірми Grabner Instruments – портативний експрес-аналізатор бензинів і дизельного палива. Визначає близько 30 показників, серед них – критичні;
- також інші: аналізатори температури спалаху дизельного палива в закритому тиглі (марки Eraflash) і граничної температури фільтрування дизпалива (марки Koehler), аналізатори сірки, які мають можливість вимірювати вміст сірки в нафтопродуктах у відповідній з вимогами стандартів Євро-4 і Євро-5.

Щоб уникнути будь-яких збоїв у роботі цієї техніки, максимально адаптувати її до функціонування в пересувних умовах, в машинах встановлені антивібраційні подушки, системи кондиціонування і витяжки [11].

**Висновок.** У роботі проаналізовано номенклатуру засобів вимірювальної техніки України, які призначені для випробування паливно-мастильних матеріалів і підлягають повірці (калібруванню). МЛПММ є об'єктом підвищеного ризику, так як в ній повинні зберігатись хімічні реактиви, вимірювальні прилади, нафтопродукти, які досліджуються при високих температурах.

Таким чином, за результатами проведених досліджень були визначені основні шляхи модернізації мобільних повірочних лабораторій засобів вимірювальної техніки для визначення якісних характеристик паливно-мастильних матеріалів. МЛПП надають змогу якісно, своєчасно, в найкоротші терміни, в визначених місцях та в складних погодних умовах провести вимірювання.

#### Список використаних джерел

1. ASTM D02 Handbook – Petroleum Products, Liquid Fuels, and Lubricants. – West Conshohocken: ASTM International, 2023. – Vols. 05.01-05.05.
2. Бойченко С.В. Рациональное использование углеводневых топлив. – Київ : НАУ, 2001. – 216 с.
3. Гаєва Л. І. Використання експлуатаційних матеріалів і економія паливно-енергетичних ресурсів: навч. посібник. – Івано-Франківськ : Факел, 2001. – 274 с.
4. Crouse, W. W. Automotive Fuels and Lubricants. Warrendale, PA : SAE International, 2018. – 300 p.
5. Owen, K. Modern Petroleum Technology. 2 vol. set. Chichester : Wiley, 2022. – 1200 p.
6. Speight, J.G. Handbook of Petroleum Product Analysis. 2nd ed. Hoboken : John Wiley & Sons, 2015. 434 p.
7. Rand, S.J. Significance of Tests for Petroleum Products. 9th ed. West Conshohocken : ASTM International, 2017. – 250 p.
8. Чинков В. Н. Комплексна методика оптимізації параметрів складних технічних об'єктів. Український метрологічний журнал. – 2003. – № 1. – С. 11–15.
9. Basha, S. A. Portable and Automated Fuel Quality Monitoring Systems. Journal of Sensors and Actuator Networks. – 2021. – Vol. 10, iss. 2. – P. 32.
10. ДСТУ EN 14274:2023 (EN 14274:2022, IDT) Автомобільне паливо. Оцінка якості палива, що поставляється споживачам.
11. ДСТУ ISO/IEC 17025:2019 Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій.

## УДК 623.6

Гайдай Г. Ю., к.т.н.; Лошиц В. Д.

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв

## МЕТРОЛОГІЧНЕ СУПРОВОДЖУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ТА РЕМОНТУ ВІЙСЬКОВОЇ ТЕХНІКИ

Досвід проведення сучасних локальних операцій у світі, ведення бойових дій в Сирії, проведення операції Об'єднаних сил показує, що ефективно застосування частин та підрозділів радіотехнічних військ Повітряних Сил Збройних Сил України, при вирішенні завдань бойової підготовки й бойового застосування, неможливо без всебічного матеріально-технічного забезпечення. Одним із основних елементів підтримання необхідного рівня бойової готовності радіотехнічних військ Повітряних Сил Збройних Сил України є метрологічне забезпечення зразків озброєння та військової техніки радіотехнічних військ [1].

В умовах проведення операції Об'єднаних сил силами обслуги виїзних метрологічних груп здійснюється відновлення та калібрування прецизійних (високоточних) вимірювальних приладів обробки сигналів. При обробці поступаючого з високою точністю заданого рівня сигналу в умовах зміни частоти, величини навантаження, а також протидії супротивника в підрозділах радіотехнічних військ, в якості прецизійних (високоточних) вимірювальних приладів обробки сигналів використовуються калібратори полігармонічних сигналів з нормованим спектром, що є багатозначною мірою високостабільної змінної напруги, частота й рівень якого можуть змінюватися в широких межах.

Калібратори полігармонічних сигналів використовуються облогою виїзних метрологічних груп в якості еталону для перевірки: вольтметрів, вимірювальних перетворювачів змінної напруги в постійну напругу, осцилографів, аналізаторів спектра, атенюаторів, вимірників послаблень й інших приладів. При цьому важливо визначити принципи побудови та методик оцінювання похибок калібраторів полігармонічних сигналів з нормованим спектром, що дозволяє отримати неушкоджений сигнал.

**Метою роботи** є дослідження застосування обслуговуваними метрологічними групами прецизійних вимірювальних приладів, а саме калібраторів полігармонічних сигналів з нормованим спектром, при обслуговуванні зразків озброєння підрозділів радіотехнічних військ, що в умовах введення противником завад, дозволить сформулювати неушкоджений сигнал.

При обслуговуванні прецизійних вимірюваних приладів, а саме калібраторів полігармонічних сигналів з нормованим спектром виникає питання оцінювання їх працездатності. При цьому необхідно знати, як практично застосовувати існуючі методи синтезу полігармонічних вимірювальних сигналів з нормованим спектром типу парний та непарний мультисинус, а також бінарних часоімпульсних сигналів. Для цього в ньому передбачається [2]:

- дослідити можливі принципи побудови калібраторів полігармонічних вимірювальних сигналів з нормованим спектром з урахуванням сучасної та перспективної елементної бази;
- створити макет калібратора бінарних часоімпульсно-модульованих вимірювальних сигналів;
- розробити методику оцінювання складових та отримати оцінку сумарної похибки запропонованого калібратора сигналів з нормованим спектром облогою виїзних метрологічних груп в умовах Операції Об'єднаних сил.

Запропонуємо один з найпростіших та перспективних варіантів побудови калібратора бінарних сигналів з нормованим спектром, який засновано на використанні сучасних мікропроцесорів та мікроконтролерів (МК) відомих світових виробників схемотехнічних пристроїв, таких, як Atmel, Motorola, Texas Instruments, Analog Devices, Microchip, NEC, Philips, Hitachi, Toshiba, Fujitsu тощо [3].

Варто зазначити, що серед великої чисельності типів МК значною популярністю користуються так звані PIC-контролери від компанії Microchip Technology Incorporated, до основних переваг яких відносять високу надійність, низькі ціну та енергоспоживання, а також велику номенклатуру, що дозволяє вибрати необхідний тип контролера з урахуванням розв'язуваних завдань. Характерною особливістю таких МК є розвинена периферія та RISC структура процесорного ядра. Абревіатура RISC (reduced instruction set computing) означає, що обчислення відбуваються за допомогою скороченого набору команд, а всі інструкції МК мають однакову довжину, що дозволяє не тільки оптимально використовувати ресурси пам'яті, але й значно підвищити швидкість виконання обчислювальних операцій [4].

Як приклад розглянемо застосування контролера PIC16F628A-I/P у складі калібратора бінарного ЧІМ сигналу. Даний МК є представником середнього F сімейства 8-розрядних контролерів, серед головних переваг яких виділяють [5]:

- наявність Flash-пам'яті, що допускає електричне перепрограмування;
- широкий діапазон однополярних напруг живлення;
- низьке енергоспоживання (нановатна технологія);
- можливість вибору бажаного корпусу.

Відзначимо, що головними периферійними складовими контролера PIC16F628A-I/P, які приймають участь у формуванні бінарних сигналів, є 16 розрядний таймер TMR1, Flash-пам'ять програм, а також модуль CCP1.

Один з найпростіших варіантів підключення обраного мікроконтролера у якості генератора ЧІМ сигналів наведено на рис. 1.

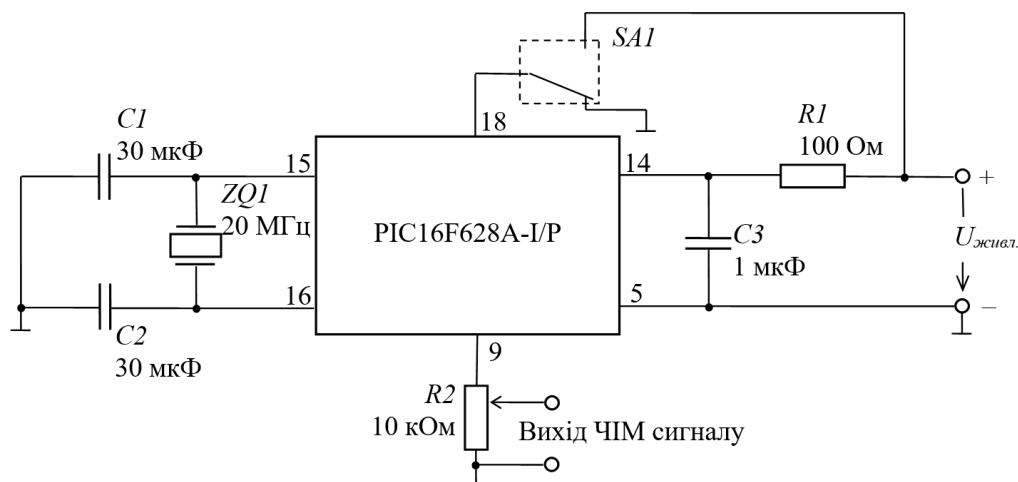


Рисунок 1 – Калібратор ЧІМ сигналу на базі мікроконтролера PIC16F628A-I/P

Призначення виводів МК, задіяних у роботі калібратора, подано в таблиці.

**Виводи МК PIC16F628A-I/P генерації для бінарних сигналів**

| Номер виводу | Позначення/функція | Призначення                                    |
|--------------|--------------------|------------------------------------------------|
| 14           | $V_{DD}$           | Додатна напруга живлення                       |
| 5            | $V_{SS}$           | Загальний вивід                                |
| 16           | PORTA<OSC1>        | Вхід тактового генератора                      |
| 15           | PORTA<OSC2>        | Вихід тактового генератора                     |
| 9            | PORTB<CCP1>        | Модуль широтно-імпульсної модуляції            |
| 18           | PORTA<RA1>         | 1-й біт двонаправленого порту А в режимі входу |

Зробимо деякі пояснення до рис. 1 і таблиці. Виводи портів та біти регістрів контролера тут і надалі подаватимуться в кутових дужках після назви порту чи регістра, наприклад, третій вивід порту В слід записати наступним чином: або PORTB<CCP1>, або PORTB<3>. Варто також зазначити, що мінімальна кількість виводів МК, задіяних для синтезу бінарного ЧНС, може складати не 6, як зображено у схемі, а лише 3. По-перше, оскільки МК має у своєму складі внутрішній тактовий генератор з частотою 4 МГц, зовнішнє тактування, зокрема з частотою 20 МГц від кварцового резонатора ZQ1, не є обов'язковим. Проте вибір зовнішнього тактового генератора обумовлений переважно меншою похибкою відтворення сигналу за рахунок дискретизації. Крім того, вхід 18 є також опційним, адже він призначений для генерації одного з двох сигналів, коди яких знаходяться в пам'яті калібратора. Наприклад, коли на вході PORTA<RA1> присутній постійний сигнал високого рівня, відтворюється ЧНС, а за умови присутності на вході PORTA<RA1> сигналу низького рівня, синтезу підлягає вимірювальний сигнал, амплітуда бінарного сигналу з нормованим спектром (ЧНС) регулюється за допомогою потенціометра R2.

Далі розглянемо методику синтезу бінарного ЧІМ сигналу за допомогою МК PIC16F628A-I/P. Її основна ідея полягає в ітераційному порівнянні 16-розрядного коду, пропорційного тривалості конкретного імпульсу, зі значенням вбудованого таймера TMR1 в режимі реального часу. В тому разі, коли відбувся збіг кодів, на виході PORTB<CCP1> контролера залежно від значень інших додаткових параметрів встановлюється або низький або високий рівень. Таким чином здійснюється перебірка усіх кодів, що відповідають тривалості імпульсів на інтервалі одного періоду, по чергові змінюючи рівень на виході PORTB<CCP1>. Аналогічно відтворюється другий, третій та інші періоди бінарного ЧІМ сигналу.

Проаналізуємо процес роботи МК більш детально. На початковому етапі відбувається ініціалізація контролера, яка передбачає встановлення або скидання бітів конфігурації та завдання початкових значень його регістрів. Термін «встановлення біта» надалі передбачатиме присвоєння логічної одиниці, а термін «скидання біта» – присвоєння логічного нуля. Так, високошвидкісне тактування від зовнішнього кварцового резонатора ZQ1 з частотою 20 МГц (режим HS) задається бітами <0, 1, 4> слова конфігурації (<0, 1, 4>="010"), а активація виводу PORTB<CCP1> як виходу синтезованого сигналу здійснюється скиданням 4-го біта регістра TRISB, тобто TRISB<4>="0".

Крім того, на початковому етапі треба скинути другий біт регістра ознак переривань PIR1: PIR1<CCP1IF>="0", адже логічна одиниця в даному біті є наслідком збігу значень таймера TMR1 та коду тривалості конкретного імпульсу.

Підводячи підсумок проведеним дослідженням, підкреслимо ряд важливих переваг запропонованого принципу побудови калібраторів бінарних ЧНС, заснованого на використанні сучасної мікропроцесорної техніки, у порівнянні з так званими класичними підходами, що застосовують певний набір дискретних елементів. Калібратор, побудований на МК, має значно поліпшені масогабаритні характеристики, оскільки в одному корпусі мікроконтролера знаходяться і лічильник, і компаратор, і запам'ятовуючий пристрій, і навіть власний кварцовий резонатор, причому функції деяких дискретних елементів можуть просто виконуватися програмно. Останнє сприяє підвищенню рівня універсалізації калібратора та значному скороченню часу на його розробку. До того ж збудований за нановатною технологією, обраний PIC контролер має дуже низьке енергоспоживання, що може дозволити йому працювати від однієї літєвої батареї приблизно 10 років. Функціональна гнучкість розробленого калібратора забезпечується наявністю серед периферії МК енергонезалежної Flash-пам'яті програм, яка допускає майже необмежену кількість циклів перепрограмування.

На відміну від калібраторів ЧІМ сигналів, калібратори полігармонічних ЧНС довільної форми, зокрема типу парний та непарний мультисинус, повинні відтворювати дискретну множину амплітуд. Традиційний підхід до побудови таких калібраторів переважно ґрунтується на застосуванні цифроаналогового синтезу ЧНС, що передбачає наявність у складі калібратора мікросхем ЦАП, пам'яті, лічильників, регістрів та інших цифрових логічних пристроїв.

Типова структурна схема калібратора ЧНС довільної форми з використанням ЦАП наведена на рис. 2.

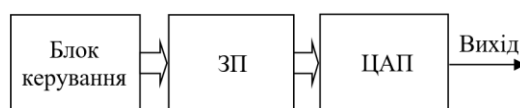


Рисунок 2 – Структурна схема калібратора

Основними складовими даної схеми є запам'ятовуючий пристрій (ЗП), в якому зберігаються коди миттєвих значень амплітуд сигналу, та ЦАП, який перетворює дані коди в аналоговий кусково-східчастий сигнал. Блок керування виконує функції обміну інформацією між користувачем та калібратором, здійснює послідовний вибір кодів миттєвих значень ЧНС (формування потрібної адреси мікросхеми пам'яті), задає темп відновлення відповідно до основної частоти сигналу тощо.

Більш гнучкий та економічний, а отже, більш перспективний варіант побудови калібратора ЧНС довільної форми, де для генерації сигналів двотональної телефонії (DTMF) застосовують МК PIC16C54 або PIC16C620 разом з ланцюгом резисторів драбинного типу R-2R M10-8-R10K від компанії BI Technologies, що уявляє собою спрощений еквівалент ЦАП (рис. 3). До основних переваг використання розглянутої схеми резисторів відносять "низьке випромінювання радіозавад та зменшений рівень гармонік високих частот, що виключає необхідність наявності в більшості практичних застосувань фільтра низьких частот".

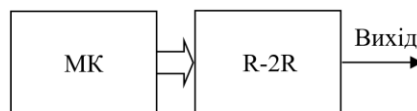


Рисунок 3 – Структурна схема калібратора ЧНС довільної форми на основі МК та ланцюга резисторів R-2R

У якості розвитку такого підходу до побудови калібраторів ЧНС довільної форми, в тому числі сигналів типу мультисинус, можна запропонувати використовувати в схемі на рис. 3 розглянутий вище МК PIC16F628A-I/P. У порівнянні з контролерами PIC16C54 та PIC16C620 він має енергонезалежну Flash-пам'ять, а отже, уникає недоліку, пов'язаного з можливістю тільки одноразового програмування.

Робота МК PIC16F628A-I/P у складі калібратора СНС типу парний та непарний мультисинус передбачає застосування одночасно всіх 8-ми виводів порту В ( $PORTB<0> - PORTB<7>$ ), причому під час ініціалізації МК всі вони програмуються на виведення сигналу. Принцип дії калібратора, розробленого за такою схемою, полягає в наступному. На підготовчому етапі в результаті оптимізації парного чи непарного мультисинуса за коефіцієнтом амплітуди отримують 8-розрядні кодові еквіваленти квантованих миттєвих значень оптимального СНС та заносять їх до пам'яті МК. На етапі синтезу код першого миттєвого значення виставляється на виводах  $PORTB<0> - PORTB<7>$  контролера, в результаті чого сума напруг на кожному з виводів з урахуванням вагових коефіцієнтів буде складати вихідну напругу калібратора, пропорційну розрахованому миттєвому значенню сигналу. Такий рівень вихідної напруги зберігається на протязі часу відновлення ЦАП  $T_{ЦАП}=T/L$ , де  $L$  – кількість рівнів кусково-східчастої апроксимації СНС на одному періоді  $T$ . За час  $T_{ЦАП}$  програма знаходить код другого миттєвого значення та в момент початку нового інтервалу апроксимації виставляє його на виводах  $PORTB<0> - PORTB<7>$  МК. Аналогічно відтворюються 2-й, 3-й та всі наступні рівні вихідного сигналу калібратора.

Практичне використання переваг парних та непарних СНС, що пов'язане з можливістю зберігати вдвічі менше кодів миттєвих значень, розглянемо на конкретному прикладі, де умовно зображено процес синтезу оптимального за коефіцієнтом амплітуди кусково-східчастого сигналу типу парний мультисинус. У загальному випадку існує два варіанти реалізації: коли кількість рівнів  $L$  на інтервалі одного періоду є або непарне (рис. 4, а), або парне (рис. 4, б) число. На підставі результатів аналізу мінімально допустимими для даних варіантів будуть такі значення величини  $L$ : відповідно 41 та 42, причому, з метою спрощення, обидві реалізації сигналів подано без урахування попередньої частотної компенсації впливу ЦАП.

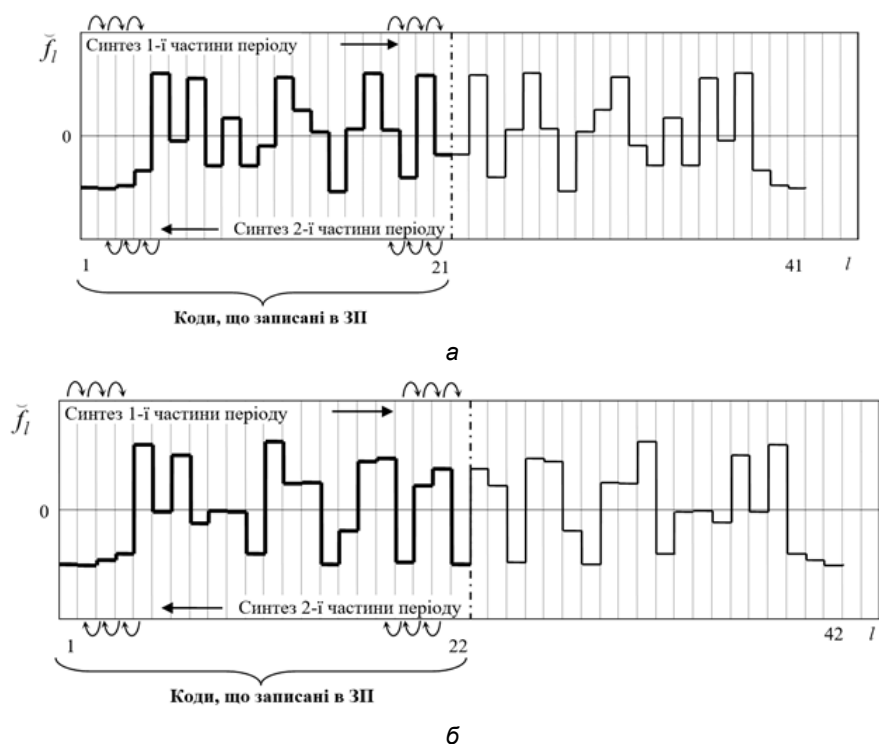


Рисунок 4 – Послідовність виведення кодів миттєвих значень парного (непарного) мультисинуса при непарній (а) та парній (б) кількості рівнів кусково-східчастої апроксимації

Частина СНС, коди миттєвих значень якої підлягають занесенню до пам'яті калібратора, виділена на обох графіках жирним та відокремлена від другої частини штрих-пунктирною лінією. Загальна кількість кодів, достатня для відтворення парного або непарного мультисинуса для першого варіанта складає  $(L/2+1/2)$ , а для другого –  $(L/2+1)$ .

З рис. 4 видно, що послідовність виведення кодів для обох наведених діаграм буде різною. Так, синтез мультисинуса за першою схемою відбувається наступним чином: відтворюється 1-й, 2-й, 3-й, ..., 20-й, 21-й, далі знову 21-й, потім 20-й, 19-й, ..., 3-й, 2-й. Відміною для другої схеми є те, що останній записаний код (22-й) буде відтворюватися не 2 рази поспіль, а лише один раз.

З урахуванням особливостей обраного МК перевагу слід віддати другому варіанту, тобто умові парної кількості рівнів апроксимації на інтервалі одного періоду, оскільки він буде більш простим при програмній реалізації.

Підводячи підсумок проведеним дослідженням щодо апаратної реалізації калібратора СНС типу парний та непарний мультисинус, слід зазначити, що найкращим, як за простотою схемотехнічної побудови, економічністю, так і за функціональними можливостями, є калібратор на основі контролера PIC16F628A-I/P та ланцюга резисторів драбинного типу R-2R.

Більш того, така схема придатна для виготовлення універсального калібратора, здатного поряд з СНС довільної форми синтезувати також ЧІМ сигнали із застосуванням модуля широтно-імпульсної модуляції ССР1. Причому в цьому разі для побудови не потрібно включати ще один контролер.

Необхідно лише змінити програмне забезпечення та у Flash-пам'ять програм МК занести дві таблиці, які містять відповідно коди миттєвих значень парного або непарного мультисинуса та коди точок переключення сигналу бінарної форми

**Висновок.** У роботі досліджено застосування прецизійних вимірювальних приладів при обслуговуванні об'єктів військової техніки метрологічною ремонтно-відновлювальною групою озброєння операції Об'єднаних сил.

Таким чином, за результатами проведеного дослідження, обслузі виїзної метрологічної групи, під час проведення обслуговування зразків озброєння та воєнної техніки підрозділів радіотехнічних військ протиповітряної оборони в зоні проведення Операції Об'єднаних сил запропоновано прецизійний вимірювальний прилад у вигляді калібратора, що працює за методом синтезу бінарних СНС за критерієм мінімуму розкиду амплітуд гармонік, який гарантовано отимує полігармонічний сигнал з нормованим спектром, що здійснює підвищення якості обробки радіолокаційної інформації в умовах протидії противника, яка поступає від зразків озброєння радіотехнічних військ Повітряних Сил Збройних Сил України, що знаходяться в зоні проведення Операції Об'єднаних сил.

#### Список використаних джерел

1. Наказ Міністра оборони України від 18.01.2010 № 12 «Про затвердження Концепції розвитку системи метрологічного забезпечення у сфері оборони на період до 2015 року та на перспективу до 2025 року».
2. Кононов В. Б. Використання вимірювальних перетворювачів виїзними метрологічними групами в умовах проведення Операції Об'єднаних сил : підручник. – Харків : ХНУПС, 2019. – 428 с.
3. Кононов В. Б. Застосування електричних вимірювань засобами вимірювальної техніки в умовах проведення АТО : навч. посібник. – Харків : ХНУПС, 2018. – 392 с.
4. Кононов В. Б. Основи експлуатації засобів вимірювальної техніки військового призначення в умовах проведення АТО : навч. посібник. – Харків : ХНУПС, 2017. – 288 с.
5. Кузнецов І. Б., Ябловський П. М. Організація метрологічного забезпечення військ (сил) : навч. посібник. У 2 ч. Ч. 1. – Київ : НУОУ, 2009. – 356 с.

УДК 629.08

Гайдай Г. Ю., к.т.н.; Вартамян В. Е.

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв

## СТЕНД ДЛЯ ПЕРЕВІРКИ ГЕОМЕТРИЧНОЇ ТОЧНОСТІ ПОВІРОЧНИХ ПЛИТ

У сучасному світі велике значення в економічній діяльності підприємства має конкурентоспроможність продукції, що виробляється. Це переважно полягає в якості продукції.

При формуванні якості продукції на машинобудівному підприємстві вимірювальна інформація про геометричні розміри, форми та розміщення поверхонь повинна буди істиною. Тобто для цього необхідно застосовувати засоби вимірювальної техніки, що мають достатні метрологічні характеристики, надійність та продуктивність контролю з врахуванням рівня розвитку науково-технічного прогресу. Тому, підвищення рівня метрологічного забезпечення плит повірочних та розмічальних обумовлено їхнім місцем в забезпеченні якості продукції, так, як на них проводиться розмітка перед виготовленням та остаточний контроль деталей після виготовлення [1].

Дана проблема і дала поштовх до розробки мобільної установки для визначення відхилення від площини повірочних та розмічальних плит.

Установка призначена для визначення відхилення від площини плит повірочних і розмічальних. За результатами дослідження плит оформлюється свідоцтво про повірку.

**Метою** створення установки є підвищення точності вимірювання відхилення від площини повірочних та розмічальних плит, а також зниження трудомісткості та часу. Це у свою чергу дасть можливість не знизити клас точності плит та полегшити роботу метрологу.

На рис. 1 представлено структурну схему установки для вимірювання відхилення від повірочних та розмічальних плит.

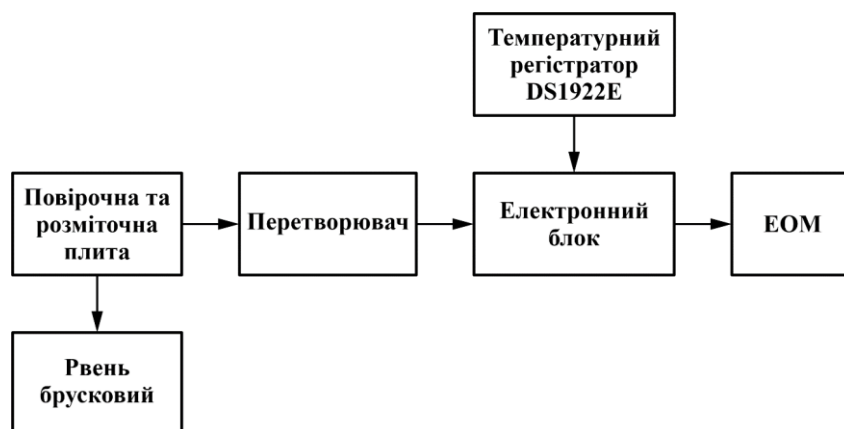


Рисунок 1 – Структурна схема установки для вимірювання відхилення від повірочних та розмічальних плит

Брусковий рівень служить для контролю горизонтального положення плити, інших плоских та циліндричних поверхонь, а також вимірювання малих кутів [2].

На рис. 2 представлено конструкцію брускового рівня.

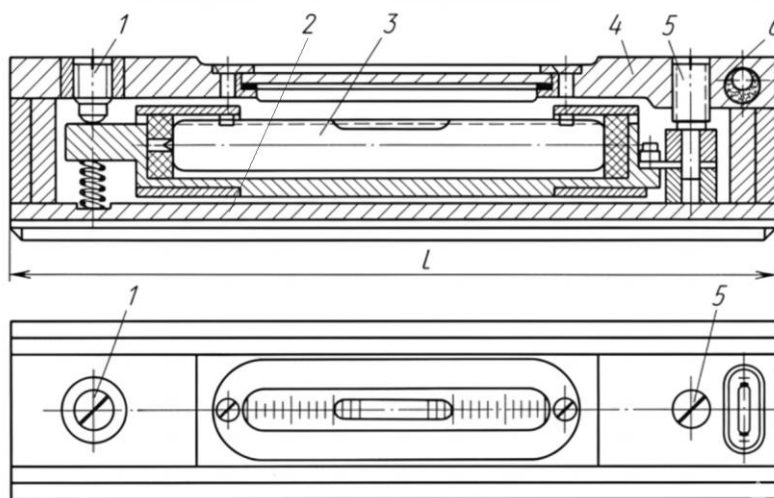


Рисунок 2 – Креслення брускового рівня

Корпус 4 брускового рівня на нижній робочій поверхні має призматичну виїмку для встановлення на циліндричні поверхні. Амбула 3 закріплена в оправу 2 та встановлена всередині корпуса рівня. Кріплення оправы ампулы до корпуса здійснюється гвинтом 5 через плоску пружину. Інший кінець оправы пружиною підібраний до гвинта регулювання 1, яким під час зборки рівня встановлюється паралельність ампулы відносно основи. Над ампулою в корпусі рівня вирізано вікно, що закрито рамкою зі склом. Установочна ампула 6 розміщена в поперечному отворі корпусу, та залита твердим составом.

Чутливим елементом рівня є ампула, що представляє собою запаяну циліндричну скляну трубку, заповнену рідиною с залишком маленького пухирця повітря [3]. Внутрішня поверхня ампулы шліфується по радіусу. На зовнішній верхній поверхні ампулы наноситься шкала з інтервалом ділень, рівним 2 мм. Дія ампулы основана на тому, що при її нахилі рівень рідини в ній завжди розташовується горизонтально та пухирець переміщується в найвищу точку ампулы. Відлік по шкалі відбувається по краям пухирця повітря.

Якщо при перевірці горизонтальності плити, пухирець повітря не встановлюється на нульові положення, то необхідно за допомогою регулювальних гвинтів виставити плиту в горизонтальне положення [4].

Електронний блок представляє собою систему автоматичного регулювання, що забезпечує постійне положення маятника відносно корпусу перетворювача, який встановлюється на вимірювальну поверхню. Положення маятника регулюється індуктивним датчиком, сигнал з якого потрапляє в систему автоматичного регулювання.

Пристрій автоматичного регулювання (ПАР) (рис. 3) призначений для підсилення модульованого сигналу від індуктивного датчика, демодуляції та автоматичного регулювання рівня сигналу, що забезпечує постійне положення маятника відносно корпусу перетворювача [5].

### Додаткові функції:

- виділення за допомогою фільтрів корисних та заглушати паразитні сигнали;
- узгодження рівнів сигналів ПАР з мікроконтролером;
- отримання стандартного рівня напруги на аналоговому виході.

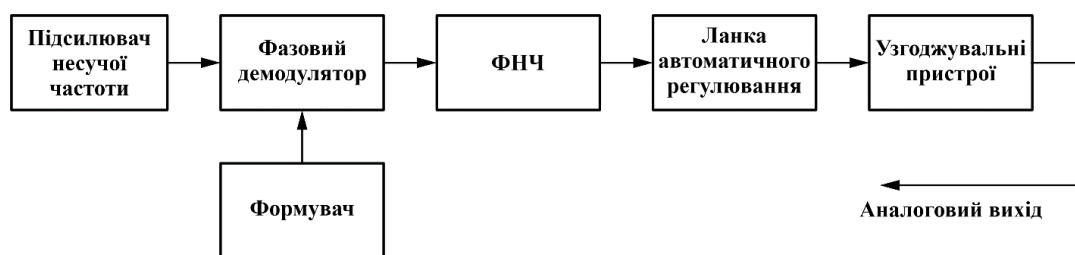


Рисунок 3 – Структурна схема ПАР

Також в електронному блоці розміщено мікроконтролер, який виконує програму записану в його пам'яті. На нього поступає інформація від системи автоматичного регулювання, а також від реєстратора температури [6].

Функціональна схема на рис. 4 показує зв'язок між основними вузлами управління і секціями пам'яті приладу DS1922E.

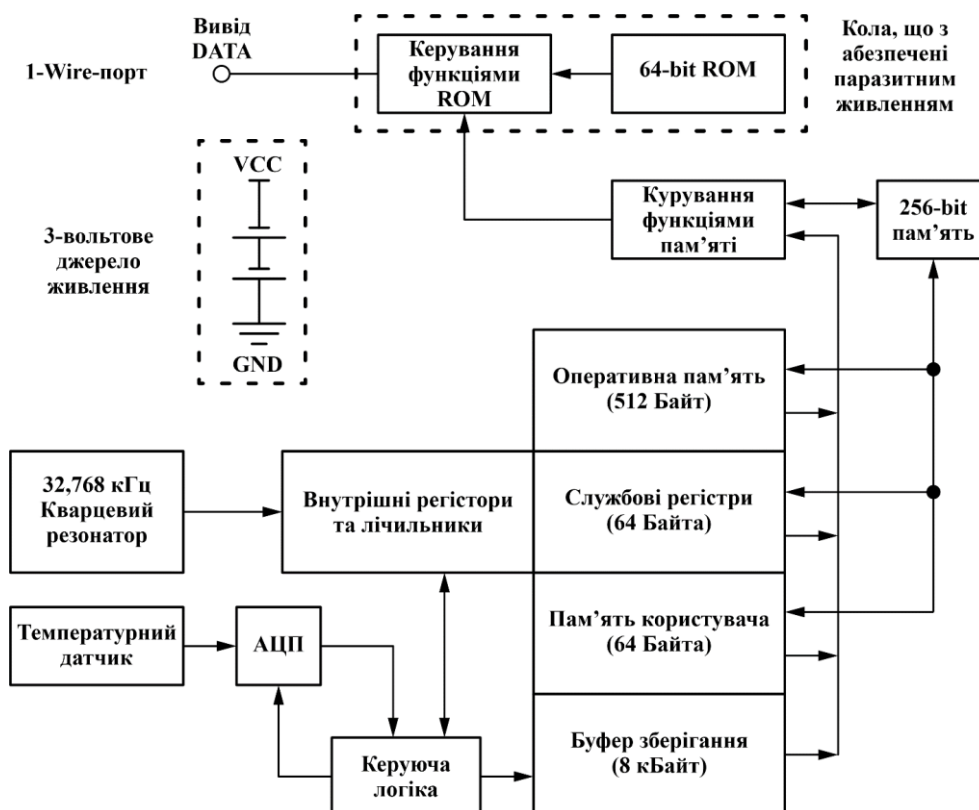


Рисунок 4 – Функціональна схема

Прилад має п'ять головних областей даних:

- 1) 64-бітовий ідентифікаційний ПЗП, прошитий лазером;
- 2) 256-бітову «блокнотну» пам'ять;
- 3) 576-байтне статичне службове ОЗУ (додаткова пам'ять);

- 4) дві 256-бітові сторінки реєстрів (керування, зберігання часу, лічильників, статусу і паролів);
- 5) 8192 байта буфера послідовних температурних відліків для зберігання накопичених результатів.

**Висновок.** У даній роботі представлено розроблено мобільну установку для визначення відхилення від площини повірочних і розмірочних плит, а також систему її метрологічного забезпечення та протокольного підтвердження результатів вимірювань. Проаналізувавши конструкцію повірочних та розмірочних плит, а також вивчивши існуючі методики їх повірки, визначили ряд особливостей:

- значна трудомісткість повірочного процесу;
- тривале зняття показань вимірювань та їх обробка вручну;
- значний вплив людського фактору на результат вимірювання, який прямо пов'язаний з точністю отримання результатів;
- неможливість повірки плит безпосередньо на місці їх установки.

На базі цього виникла нагальна потреба в створенні автоматизованої установки отримання показань та обробки результатів вимірювань із застосуванням сучасних електронних вимірювальних приладів, пов'язаних з ЕОМ. Як конструктивне рішення було знайдено електронний рівень. Були визначені ряд переваг перед іншими приладами. Серед недоліків визначили застарілу елементну базу в час високо технологічних електронних систем. Було розроблена структурну схему установки для визначення відхилення від площини повірочних та розмірочних плит. Підібрані та описані блоки, що входять до структурної схеми. Розглянуто їх будову, роботу, особливості, переваги та недоліки, а також запропоновані приклади реалізації деяких з них.

#### Список використаних джерел

1. Baliga B. J. Fundamentals of Power Semiconductor Devices. 2nd ed. Cham : Springer, 2019. 1094 p.
2. ДСТУ 2681:2019 Метрологія. Терміни та визначення. Чинний від 2020-07-01. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2019. IV, 47 с.
3. IEC 61010-1:2010+AMD1:2016+AMD2:2017 CSV Safety requirements for electrical equipment for measurement, control, and laboratory use.
4. Scherz P. Practical Electronics for Inventors. 4th ed. New York : McGraw-Hill Education, 2016. 1056 p.
5. ISO/IEC Guide 98-3:2008 Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM).
6. Sedra A. S., Smith K. C. Microelectronic Circuits. 8th ed. Oxford : Oxford University Press, 2020. 1320 p.

УДК 537.37

Мельнікова І. О., Черкасов А. О., Ясенко Д. А., Буряк В. С.

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв

## ПРОБЛЕМА НАРОЩУВАННЯ ТИПОВИХ ЛАНОК ПРИ ПОБУДОВІ СКЛАДНИХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ

Типова ланка – це елементарний елемент системи автоматичного керування, який неможливо розділити на більш прості. Вона характеризується однією вхідною і однією вихідною величиною та описується за допомогою диференціального рівняння.

**Метою роботи** є виявлення проблеми нарощування, яка виникає при побудові складних систем автоматичного керування шляхом послідовного або паралельного з'єднання простих (типових) ланок.

Складність полягає у тому, що при нарощуванні типових ланок необхідно враховувати взаємодію між ними, часові затримки, порядок системи, а також забезпечувати необхідні динамічні характеристики та стійкість загальної системи, щоб отримати адекватну математичну модель. Для аналізу таких моделей застосовують чисельні методи моделювання та обробки перехідних процесів. Некоректне нарощування може призвести до втрати стабільності або некоректного відтворення динаміки системи.

Для прикладу розглянемо типову інерційну RC-ланку, яка наведена на рис. 1.

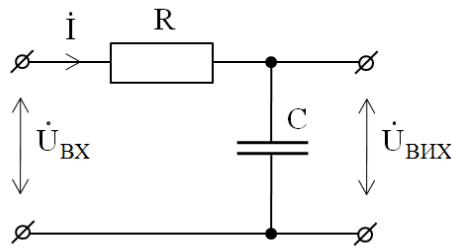


Рисунок 1 – Типова інерційна RC-ланка

Комплексний опір електричного кола, наведеного на рис. 1:

$$\underline{Z}(j\omega) = R + \frac{1}{j\omega C} = \frac{j\omega RC + 1}{j\omega C}.$$

Комплексний струм, який протікає крізь електричне коло:

$$i(j\omega) = \frac{\dot{U}_{BX}(j\omega)}{\underline{Z}(j\omega)} = \frac{\dot{U}_{BX}(j\omega) \cdot j\omega C}{j\omega RC + 1}.$$

Комплексна вихідна напруга, що знімається з ємності C:

$$\dot{U}_{VИХ}(j\omega) = \frac{1}{j\omega C} \cdot i(j\omega) = \frac{\dot{U}_{BX}(j\omega)}{j\omega RC + 1}.$$

Комплексна передаточна функція інерційної ланки (рис. 1):

$$W(j\omega) = \frac{\dot{U}_{VИХ}(j\omega)}{\dot{U}_{BX}(j\omega)} = \frac{1}{j\omega RC + 1}. \quad (1)$$

Зробивши у формулі (1) заміну виразу  $j\omega$  на оператор Лапласа  $s$ , отримаємо:

$$W(s) = \frac{1}{s \cdot RC + 1}.$$

Якщо візьмемо  $R = 100$  Ом;  $C = 10$  мкФ, то тоді:

$$W(s) = \frac{1}{s \cdot 0,1 \cdot 10^{-3} + 1}. \quad (2)$$

Тепер здійснимо нарощування – об'єднаємо дві такі ланки послідовно. Відповідно до правила згортання послідовних ланок матимемо:

$$W(s) = \frac{1}{s \cdot 0,1 \cdot 10^{-3} + 1} \cdot \frac{1}{s \cdot 0,1 \cdot 10^{-3} + 1}. \quad (3)$$

Але вираз (3) є не зовсім коректним, оскільки він утворений з того припущення, що кожна наступна ланка не навантажує собою попередню, а кожна попередня ланка ніяк не впливає на наступну.

На рис. 2 наведена електрична принципова схема послідовного з'єднання двох RC-ланок. Розглянемо цю схему з позицій електротехніки.

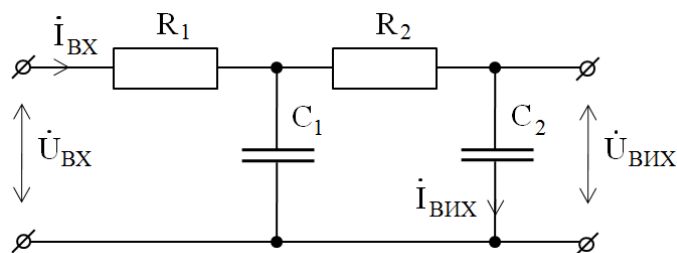


Рисунок 2 – Нарощування RC-ланки (послідовне з'єднання)

Комплексний опір отриманого електричного кола:

$$\underline{Z}(j\omega) = R_1 + \frac{\frac{1}{j\omega C_1} \cdot \left( R_2 + \frac{1}{j\omega C_2} \right)}{\frac{1}{j\omega C_1} + R_2 + \frac{1}{j\omega C_2}}.$$

Комплексний струм, який протікає на вході електричного кола:

$$i_{\text{ВХ}}(j\omega) = \frac{\dot{U}_{\text{ВХ}}(j\omega)}{\underline{Z}(j\omega)}.$$

Комплексний струм, який протікає на виході електричного кола:

$$i_{\text{ВІХ}}(j\omega) = i_{\text{ВХ}}(j\omega) \cdot \frac{\frac{1}{j\omega C_1}}{\frac{1}{j\omega C_1} + R_2 + \frac{1}{j\omega C_2}}.$$

Комплексна вихідна напруга, що знімається з ємності  $C_2$ :

$$\dot{U}_{\text{ВІХ}}(j\omega) = \frac{1}{j\omega C_2} \cdot i_{\text{ВІХ}}(j\omega).$$

Комплексна передаточна функція:

$$W(j\omega) = \frac{\dot{U}_{\text{ВІХ}}(j\omega)}{\dot{U}_{\text{ВХ}}(j\omega)} = \frac{1}{(j\omega)^2 \cdot R_1 C_1 R_2 C_2 + j\omega \cdot (R_1 C_1 + R_2 C_2 + R_1 C_2) + 1}.$$

Зробивши заміну  $j\omega$  на  $s$ , матимемо:

$$W(s) = \frac{1}{s^2 \cdot R_1 C_1 R_2 C_2 + s \cdot (R_1 C_1 + R_2 C_2 + R_1 C_2) + 1}. \quad (4)$$

Якщо здійснимо перегрупування у знаменнику виразу (4) і винесемо спільний множник за дужки, то отримаємо:

$$\begin{aligned} W(s) &= \frac{1}{s^2 \cdot R_1 C_1 R_2 C_2 + s \cdot R_1 C_1 + s \cdot R_2 C_2 + s \cdot R_1 C_2 + 1} = \frac{1}{\left( s^2 \cdot R_1 C_1 R_2 C_2 + s \cdot R_1 C_1 \right) + \left( s \cdot R_2 C_2 + 1 \right) + s \cdot R_1 C_2} = \\ &= \frac{1}{s \cdot R_1 C_1 \cdot \left( s \cdot R_2 C_2 + 1 \right) + \left( s \cdot R_2 C_2 + 1 \right) + s \cdot R_1 C_2} = \frac{1}{\left( s \cdot R_1 C_1 + 1 \right) \cdot \left( s \cdot R_2 C_2 + 1 \right) + s \cdot R_1 C_2}. \end{aligned} \quad (5)$$

Доданок  $s \cdot R_1 C_2$ , який з'явився у знаменнику передаточної функції (5), обумовлений взаємним впливом першої ланки на другу, а другої на першу.

Виконаємо розкладання виразу (4) на множники:

$$a = R_1 C_1 R_2 C_2; \quad b = R_1 C_1 + R_2 C_2 + R_1 C_2; \quad c = 1;$$

$$D = b^2 - 4ac; \quad s_1 = \frac{-b + \sqrt{D}}{2a}; \quad s_2 = \frac{-b - \sqrt{D}}{2a};$$

$$W(s) = \frac{1}{a \cdot (s - s_1) \cdot (s - s_2)} = \frac{1}{a} \cdot \frac{1}{s - s_1} \cdot \frac{1}{s - s_2}. \quad (6)$$

У виразі (6) чисельник та знаменник другого множника розділимо на  $-s_1$ , а чисельник та знаменник третього множника розділимо на  $-s_2$ , тоді отримаємо:

$$W(s) = \frac{1}{a} \cdot \frac{\frac{1}{-s_1}}{\frac{s - s_1}{-s_1}} \cdot \frac{\frac{1}{-s_2}}{\frac{s - s_2}{-s_2}} = \frac{1}{a} \cdot \frac{T_1}{s \cdot T_1 + 1} \cdot \frac{T_2}{s \cdot T_2 + 1} = K \cdot \frac{1}{s \cdot T_1 + 1} \cdot \frac{1}{s \cdot T_2 + 1}, \quad (7)$$

$$\text{де } T_1 = \frac{1}{-s_1}; \quad T_2 = \frac{1}{-s_2}; \quad K = \frac{T_1 T_2}{a}.$$

Якщо візьмемо  $R_1 = R_2 = 100 \text{ Ом}$ ;  $C_1 = C_2 = 10 \text{ мкФ}$ , то тоді:

$$a = R_1 C_1 R_2 C_2 = 1 \cdot 10^{-6}; \quad b = R_1 C_1 + R_2 C_2 + R_1 C_2 = 3 \cdot 10^{-3}; \quad c = 1;$$

$$D = b^2 - 4ac = 5 \cdot 10^{-6};$$

$$s_1 = \frac{-b + \sqrt{D}}{2a} = -381,97; \quad s_2 = \frac{-b - \sqrt{D}}{2a} = -2,62 \cdot 10^3;$$

$$T_1 = \frac{1}{-s_1} = 2,62 \cdot 10^{-3}; \quad T_2 = \frac{1}{-s_2} = 3,82 \cdot 10^{-4}; \quad K = \frac{T_1 T_2}{a} = 1;$$

і, отже, вираз (7) набуває вигляд:

$$W(s) = \frac{1}{s \cdot 2,62 \cdot 10^{-3} + 1} \cdot \frac{1}{s \cdot 3,82 \cdot 10^{-4} + 1}. \quad (8)$$

На рис. 3 для порівняння представлені дві логарифмічні амплітудно-частотні характеристики (ЛАЧХ). ЛАЧХ, яку позначено цифрою 1, побудована на основі передаточної функції, отриманої шляхом простого множення між собою передаточних функцій двох однакових RC-ланок відповідно до виразу (3). ЛАЧХ, яку позначено цифрою 2, побудована відповідно до виразу (8). Тут враховані взаємозв'язки між RC-ланками та взаємні впливи цих ланок одна на одну.

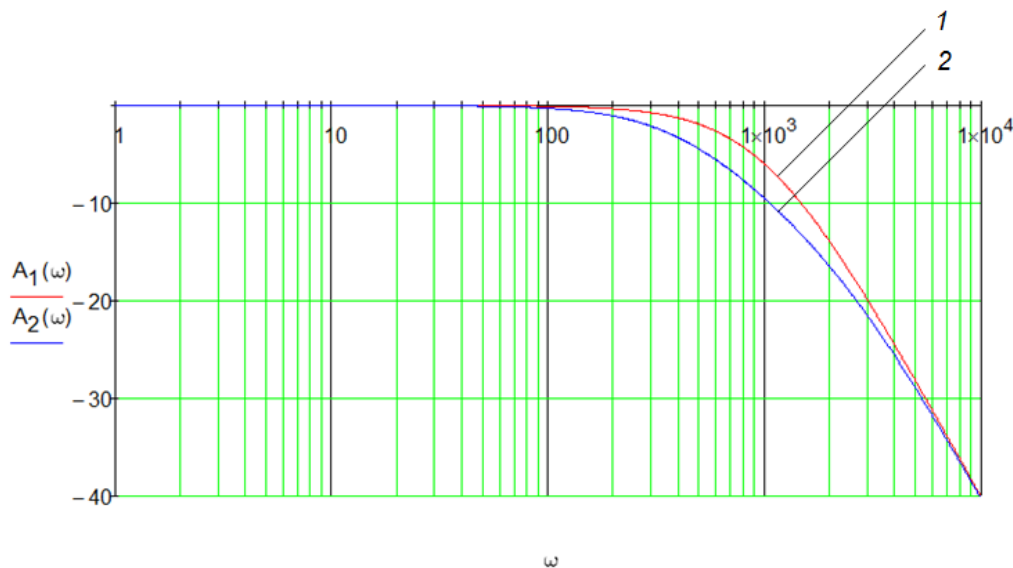


Рисунок 3 – Порівняння логарифмічних амплітудно-частотних характеристик

Взагалі ці ЛАЧХ дуже подібні між собою і в широкому частотному діапазоні навіть точно співпадають. Але існує певна розбіжність між ними у діапазоні кутових частот приблизно від  $50 \text{ с}^{-1}$  до  $10\,000 \text{ с}^{-1}$ , і у деяких випадках це може бути суттєвим. Так, використання ЛАЧХ з номером 1 замість ЛАЧХ з номером 2 дасть хибне обчислення такого важливого параметру, як частота зрізу (отримане значення виявиться значно більшим, ніж є насправді; у нашому випадку це  $643 \text{ с}^{-1}$  замість  $374 \text{ с}^{-1}$ ).

На рис. 4 та рис. 5 також зроблено порівняння перехідних характеристик  $h(t)$  та імпульсних характеристик  $g(t)$ : цифрою 1 позначені характеристики, отримані відповідно до виразу (3), а цифрою 2 – отримані відповідно до виразу (8).

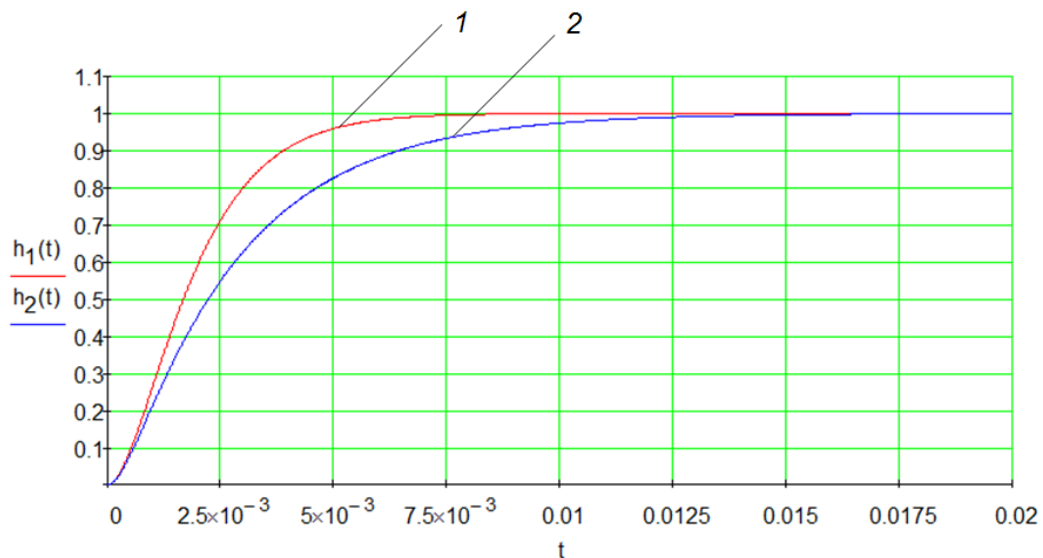


Рисунок 4 – Порівняння перехідних характеристик

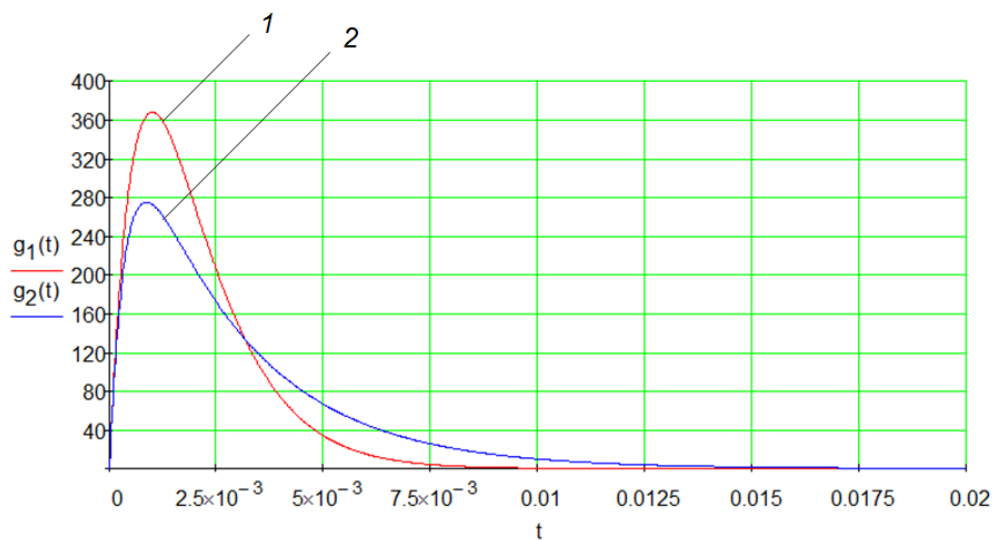


Рисунок 5 – Порівняння імпульсних характеристик

**Висновки.** При побудові складних систем автоматичного керування обов'язково потрібно враховувати взаємозв'язки та взаємні впливи, що виникають між типовими ланками при їх нарощуванні. У протилежному випадку спроектовані системи працюватимуть некоректно.

#### Список використаних джерел

1. Гоголюк П.Ф., Гречин Т.М. Теорія автоматичного керування : підручник. – Львів : НУ «Львів. політехніка», 2008. – 257 с.
2. Основи радіоавтоматики : навч. посібник / уклад. Рябенський В.М., Буряк В.С. – Миколаїв : Іліон, 2024. – 178 с.
3. Пістун Є.П., Стасюк І.Д. Основи автоматики та автоматизації : навч. посібник. – Львів : НУ «Львів. політехніка», 2018. – 336 с.
4. Попович М.Г., Ковальчук О.В. Теорія автоматичного керування : підручник. – Київ : Либідь, 2007. – 656 с.
5. Теорія автоматичного керування : навч. посібник / Штіфзон О.Й., Новіков П.В., Бунь В.П. – Київ : НУ «КПІ ім. І. Сікорського», 2020. – 144 с.
6. Шаруда В.Г. Практикум з теорії автоматичного управління : навч. посібник. – Дніпропетровськ : НГУ, 2002. – 414 с.

УДК 004.056.5

*Руднік А. А.**Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв**Мадінов М. Л.**Науково-навчальний інститут телекомунікацій**Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій, м. Київ**Шкітов А. А.**Відкритий міжнародний університет розвитку людини «Україна», м. Київ**Лацик Н. С.**Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ*

## ФАКТОРИ ЗАГРОЗ ФУНКЦІОНУВАННЯ SCADA-СИСТЕМ В АВТОМАТИЗОВАНИХ ВИРОБНИЧИХ КОМПЛЕКСАХ

SCADA-системи відіграють життєву важливу роль в управлінні автоматизованими та промисловими процесами в енергетиці, транспорті, водопостачанні, виробництві та інших критично важливих галузях. Вони забезпечують безперервний моніторинг, збір і аналіз даних у реальному часі, а також дозволяють операторам дистанційно керувати технологічними процесами. Завдання, що покладаються на SCADA-системи, вже давно виходять за межі управління локальними об'єктами автоматизації та окремими технологічними ділянками [1]. У сучасних умовах вони виступають у ролі ключового елемента комплексних, розподілених систем управління підприємством, забезпечуючи інтеграцію виробничих, інформаційних та аналітичних процесів у єдиний цифровий простір [1, 2]. За допомогою SCADA реалізуються багаторівневі структури управління, що охоплюють як цеховий рівень, і рівень всього підприємства міста і навіть віддалених об'єктів, розташованих на значних відстанях один від одного. Крім того, сучасні SCADA-системи активно використовуються для збирання, зберігання та аналізу великих обсягів технологічних даних, що дозволяє здійснювати глибоку аналітичну діяльність, прогнозувати поведінку систем, виявляти відхилення від нормальних режимів роботи та приймати об'єднані управлінські рішення. Вони інтегруються із системами планування ресурсів підприємства (ERP), системами управління виробництвом (MES), а також іншими інформаційними платформами, забезпечуючи підтримку планового виробництва, оптимізацію ресурсів та підвищення загальної ефективності роботи обладнання.

**Мета роботи** – проаналізувати та систематизувати основні фактори загроз, що впливають на надійність, безперебійність і безпеку функціонування SCADA-систем в автоматизованих комплексах, а також визначити механізми їх виникнення.

Особливого значення набуває можливість віддаленого моніторингу та управління технологічними процесами в реальному часі, що дозволяє оперативно реагувати на аварійні ситуації, знижувати час простою та мінімізувати вплив людського фактору. Використання WEB-доступу та хмарних технологій розширює функціональність SCADA-систем, забезпечуючи доступ до інформації для різних категорій користувачів – від операторів та інженерів до управлінського персоналу – незалежно від їхнього фізичного розташування.

Однак зі зростанням рівня цифровізації та інтеграції з корпоративними мережами й Інтернетом (рис. 1) значно підвищується ризик кібератак на такі системи, що може призвести до масштабних економічних збитків, порушення виробничої інфраструктури. Існують ключові міжнародні стандарти й законодавчі вимоги у сфері промислової кібербезпеки, такі як IEC 62443, NIST та ISO/IEC 27001, а також їх застосування для забезпечення надійного захисту SCADA-систем. Значна увага надається важливості фізичної безпеки об'єктів, захисту серверних приміщень і мережевого обладнання, використанню багатофакторної автентифікації, систем виявлення вторгнень та регулярного оновлення програмного забезпечення. Окремо висвітлюються ризики, пов'язані з неправильною конфігурацією систем, відсутністю резервного копіювання та неналежним контролем змін. У цьому контексті підкреслюється необхідність упровадження чітких політик безпеки, процедур аудиту та постійного моніторингу виробничої інфраструктури.

Усі сервери та автоматизовані робочі місця (APM) операторів в автоматизованих системах керування технологічними процесами (АСУ ТП) функціонують під управлінням певних операційних систем, які, як і будь-яке програмне забезпечення, мають власні вразливості. Для більшості відомих уразливостей виробники випускають відповідні оновлення та патчі безпеки. Проте, зважаючи на те, що сервери часто працюють у безперервному режимі 24/7, не завжди існує можливість оперативного встановлення цих оновлень без зупинки технологічного процесу. У результаті між моментом виявлення вразливості та її усунення операційні системи залишаються вразливими до дій злоумисників, що створює додатковий ризик для безпеки всієї інфраструктури.

У промислових середовищах нерідко використовуються застарілі версії операційних систем, які вже не підтримуються виробниками, що значно підвищує ймовірність успішних кібератак. Самі SCADA-системи, як складні програмно-апаратні комплекси, також мають низку вразливостей. Оновлення для них, як правило, виходять значно рідше, ніж для загальнодоступних операційних систем, а процес оновлення часто є складним та ризикованим через необхідність перевірки сумісності з обладнанням і програмними модулями. Крім того, багато SCADA-систем розроблялися в той час, коли питання кібербезпеки не були пріоритетними, тому вони можуть не мати вбудованих сучасних механізмів захисту, таких як шифрування трафіку, багатофакторна автентифікація чи журналювання подій безпеки.

Сучасні SCADA-системи, як правило, інтегровані з корпоративними інформаційними системами підприємства, використовують спільні комп'ютерні мережі та часто мають доступ до глобальної мережі Інтернет. З одного боку, такі рішення істотно підвищують ефективність управління, спрощують обмін даними та дозволяють оптимізувати витрати. З іншого боку, це створює додаткові канали потенційного проникнення для злоумисників. Особливо небезпечним є використання бездротових каналів зв'язку та віддаленого доступу до АСУ ТП без належних механізмів авторизації та автентифікації. Відсутність шифрування даних, використання слабких паролів або загальнодоступних облікових записів значно збільшують ризик несанкціонованого доступу до критично важливих систем [5].



Рисунок 1 – Сучасна SCADA-система з доступом в Інтернет

АСУ ТП включають у свою структуру розгалужену мережу каналів зв'язку, джерела безперебійного живлення, сервери, контролери, датчики та інше спеціалізоване обладнання, яке часто розміщується на великій території або в малодоступних місцях [4, 5]. Таке обладнання може працювати в складних умовах: при екстремальних температурах, підвищеній вологості, запиленості, вібраціях тощо. У таких умовах не завжди можливо забезпечити повноцінний фізичний захист кожного елемента системи, що створює ризик несанкціонованого фізичного доступу, пошкодження або цілеспрямованого втручання в роботу обладнання.

Низький рівень кваліфікації або недостатня підготовка обслуговуючого персоналу часто призводить до помилок у налаштуванні параметрів безпеки SCADA-системи, неправильного керування обліковими записами, правами доступу та політиками безпеки. Такі помилки можуть стати відправною точкою для успішної атаки. Крім того, некваліфікований персонал не завжди здатний вчасно розпізнати ознаки кібератаки чи аномальної поведінки системи, що призводить до втрати дорогоцінного часу для реагування на інцидент. Захист SCADA-систем є складним і багатоетапним завданням, яке потребує комплексного підходу. Система інформаційної

безпеки АСУ ТП повинна проектуватися ще на етапі формування технічного завдання на створення або модернізацію системи. Уже на стадії впровадження SCADA необхідно розробити та затвердити внутрішній стандарт підприємства з інформаційної безпеки, що регламентуватиме правила доступу, використання, обслуговування та захисту системи. Усі заходи з інформаційної безпеки повинні бути економічно обґрунтованими та співмірними з рівнем ризиків і можливими збитками у разі порушення роботи SCADA-системи.

**Висновок.** У ході виконання роботи було встановлено, що сучасні SCADA-системи є ключовим елементом автоматизованих комплексів та відіграють критичну роль у забезпеченні безперервного функціонування технологічних процесів у промисловості, енергетиці, транспорті, водопостачанні та інших стратегічно важливих галузях. Вони забезпечують збирання, обробку й аналіз технологічних даних у реальному часі, підтримують багаторівневу структуру управління та інтегруються з корпоративними інформаційними системами, створюючи єдиний цифровий простір підприємства.

#### Список використаних джерел

1. Абрамов В.О., Клименко С.Ю. Базові технології комп'ютерних мереж : навч. посібник. – Київ : Київ. ун-т ім. Б. Грінченка, 2011. – 291 с.
2. Пупена О.М. Розроблення людино-машинних інтерфейсів та систем збирання даних з використанням програмних засобів SCADA/HMI : навч. посібник. – Київ : Ліра-К, 2020. – 594 с.
3. Богуш В. М., Богуш В. В., Бровко В. Д., Настрадін В. П. Основи кіберпростору, кібербезпеки та кіберзахисту : навч. посібник / під. ред. В. М. Богуша. – Київ : Ліра-К, 2020. – 554 с.
4. Бочков В.М., Сілін Р.І. Обладнання автоматизованого виробництва. – Львів : Львів. політехніка, 2015. – 404 с.
5. Трегуб В.Г. Проектування систем автоматизації : навч. посібник. – Київ : Ліра-К, 2017. – 344 с.

## ЗМІСТ

|                                                                                                                                                                                                                         |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>ПЛЕНАРНА СЕКЦІЯ .....</b>                                                                                                                                                                                            | <b>3</b>  |
| <i>Волянський Ю. С., Яценко В. С., Мицик А. І., Волянська Я. Б., Волянський С. М.</i><br>МОДЕРНІЗАЦІЯ АРХІТЕКТУРИ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ ШЛЯХОМ ЗАСТОСУВАННЯ<br>АКУМУЛЯТОРНИХ СИСТЕМ ЗБЕРІГАННЯ ЕНЕРГІЇ .....          | 3         |
| <i>Макаренко Д. С., Козлов М. О.</i><br>ОГЛЯД КОТУШОК РОГОВСЬКОГО ТА ОСОБЛИВОСТЕЙ ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ<br>В ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМАХ.....                                                                                | 4         |
| <i>Тимченко А. С., Федоров А. Д., Савченко О. В., Іванов А. В.</i> .....                                                                                                                                                | 7         |
| ДОСВІД ВИКОРИСТАННЯ КОНСТРУКТОРА ПЕРСОНАЛЬНОГО СУПУТНИКА.....                                                                                                                                                           | 7         |
| <i>Савун І. А., Москва В. В., Ушкаренко О. О.</i><br>ІНСТРУМЕНТАЛЬНІ ЗАСОБИ МОДЕЛЮВАННЯ ЦИФРОВИХ ФІЛЬТРІВ У ВБУДОВАНИХ<br>МІКРОПРОЦЕСОРНИХ СИСТЕМАХ .....                                                               | 9         |
| <i>Обрубов А. В., Обрубов В. А.</i><br>ДОСЛІДЖЕННЯ ПОВЕДІНКИ РЕЗОНАНСНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА З АВТОГЕНЕРАЦІЄЮ<br>ПРИ ФАЗОВО-РЕЛЕЙНОМУ РЕГУЛЮВАННІ .....                                                                      | 11        |
| <i>Ігнатенко Є. В., Костюченко В. І., Новогорецький С. М.</i><br>КЕРУВАННЯ РЕАКТИВНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ В УМОВАХ НЕСИМЕТРІЇ РЕЖИМУ .....                                                                                    | 14        |
| <i>Іванов А. В., Честних М. В.</i><br>РЕГУЛЮВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СИЛОВОЇ ТА ГІДРОДИНАМІЧНОЇ ДІЇ<br>НА РОЗПЛАВ ШЛЯХОМ ЗМІНИ ГЕОМЕТРІЇ ЕЛЕКТРОДНОЇ СИСТЕМИ ПРИ ЕЛЕКТРОСТРУМОВІЙ<br>ОБРОБЦІ РОЗПЛАВУ ..... | 18        |
| <i>Сіриченко С. О., Герасін О. С.</i><br>СИСТЕМИ КОМП'ЮТЕРНОГО ЗОРУ У СФЕРІ РОБОТОТЕХНІКИ .....                                                                                                                         | 24        |
| <i>Сироватка А. В.</i><br>ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО РЕЗОНАНСНОГО ПРИВОДА<br>У ВІБРАЦІЙНИХ МАШИНАХ ДЛЯ РІЗНОЧАСТОТНОГО УЩІЛНЕННЯ БЕТОННИХ СУМІШЕЙ.....                                                  | 29        |
| <b>СЕКЦІЯ 1. АВТОМАТИЗОВАНИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД .....</b>                                                                                                                                                                    | <b>32</b> |
| <i>Васильєв О. Г., к.т.н.; Савченко О. В.; Заворотний А. О.</i><br>МОДЕРНІЗАЦІЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА МАНІПУЛЯТОРА У СКЛАДІ<br>РТК МЕХАНООБРОБКИ .....                                                       | 32        |
| <i>Білюк І. С., Савченко О. В., Козлов А. Ю., Іванов А. В., Теплов С. Б.</i><br>МОДЕРНІЗАЦІЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТОКАРНОГО ПАТРОННО-ЦЕНТРОВОГО ВЕРСТАТА.....                                                              | 37        |
| <i>Білюк І. С., Савченко О. В., Козлов А. Ю., Іванов А. В., Ярошинський О. В.</i><br>ПРОЄКТУВАННЯ ЛОГІЧНОГО КОНТРОЛЕРА .....                                                                                            | 40        |
| <i>Білюк І. С., Савченко О. В., Козлов А. Ю., Іванов А. В., Онищенко О. В.</i><br>СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ ЖАЛЮЗІ .....                                                                                        | 42        |
| <i>Білюк І. С., Савченко О. В., Козлов А. Ю., Іванов А. В., Пристайко Т. І.</i><br>СИСТЕМА КЕРУВАННЯ РОБОТА-МАНІПУЛЯТОРА МОДЕЛІ М20П.40.01 .....                                                                        | 45        |
| <i>Савченко О. В., Білюк І. С., Шамраєв В. В., Заворотний А. О.</i><br>МОСТОВИЙ БЛОК ЖИВЛЕННЯ ДЛЯ СИСТЕМ АВТОМАТИКИ .....                                                                                               | 49        |

**СЕКЦІЯ 2. ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНІ КОМПЛЕКСИ, ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ І АПАРАТИ.****ПІДВОДНА ТЕХНІКА І ТЕХНОЛОГІЇ .....52***Черчель С. Є., Овсянников В. М.*

УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ РЕЗЕРВНОГО ЖИВЛЕННЯ АПАРАТУРИ ГМСЗЛ НА БАЗІ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ LI-ІОН НАКОПИЧУВАЧІВ ТА ГІБРИДНОЇ ФІЛЬТРОКОМПЕНСУЮЧОЇ СИСТЕМИ..... 52

*Чернов І. М., Овсянников В. М.*

ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРИ ТРЕНАЖЕРНОГО ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ПІДГОТОВКИ ОПЕРАТОРІВ ГЛОБАЛЬНОЇ МОРСЬКОЇ СИСТЕМИ ЗВ'ЯЗКУ У ВИПАДКУ ЛИХА ТА ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗПЕКИ (ГМСЗЛБ) ..... 54

*Чилій І. А., Бабкін Г. В.*

ВДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ЛІФТОВОЇ ЛЕБІДКИ З ВИКОРИСТАННЯМ ВЕКТОРНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ..... 60

*Боросан М. С., Овсянников В. М.*

АНАЛІЗ СХЕМОТЕХНИКИ ПРИСТРОЇВ АВТОМАТИЧНОЇ СИНХРОНІЗАЦІЇ ГЕНЕРАТОРІВ..... 64

*Пальчиков О. О.*

АНАЛІЗ МАТЕРІАЛІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ ІЗОЛЯТОРІВ ..... 69

*Пальчиков О. О.*

АНАЛІЗ ЕВОЛЮЦІЇ ВАКУУМНИХ ВИМИКАЧІВ..... 73

*Федорак В. В., Бабкін Г. В.*

МОДЕЛЮВАННЯ ГІДРОТЕХНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК РУШІЇВ ТЕЛЕКЕРОВАНОВОГО ПІДВОДНОГО АПАРАТУ ..... 79

*Ставинський Р. А., Авдєєва О. А., Савченко О. В.*

СИСТЕМА ЕЛЕКТРОПРИВОДУ АВТОМАТИЧНОЇ ВЕНТИЛЯЦІЇ ГЕНЕРУЮЧОГО АГРЕГАТУ СУДНОВОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ..... 81

*Зінчук В. В., Чекунов В. К.*

ВИКОРИСТАННЯ ГІБРИДНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК НА СУДНАХ ..... 83

*Грудініна Г. С., Шведов М. В., МIRONENKO М. В.*

СУЧАСНІ ЕЛЕКТРОПРИВОДИ АВТОНОМНИХ МАЛОРОЗМІРНИХ СУДЕН..... 92

*Новогрецький С. М., Костюченко В. І., Баришник Ю. М.*

ВПЛИВ СТАЛОЇ ЧАСУ ПОДОВЖНЬОЇ ОБМОТКИ ЗБУДЖЕННЯ НА СТАТИЧНУ СТІЙКІСТЬ ПАРАЛЕЛЬНОЇ РОБОТИ СИНХРОННИХ ГЕНЕРАТОРІВ..... 94

*Грудініна Г. С., Радченко О. В.*

ЕЛЕКТРОПРИВОД У РОБОТИЗОВАНИХ МОРСЬКИХ ОБ'ЄКТАХ..... 99

**СЕКЦІЯ 3. ПЕРЕТВОРЮВАЛЬНА ТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ.****АВТОМАТИКА, ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ І ПРИСТРОЇ.....102***Рябенський В. М., Варганов М. О.*

ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ГІРАТОРІВ..... 102

*Рябенський В. М., Баліцький Н. О.*

МОДЕЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕМБРОБЛОКУ ..... 105

*Якубець К. В., Герасін О. С.*

СИСТЕМА ВІЗУАЛІЗАЦІЇ КЕРОВАНОВОГО ФУНКЦІОНУВАННЯ МОБІЛЬНОГО РОБОТА ..... 108

*Стрункін Г. М.*

ДОСВІД РОЗРОБКИ СНАББЕРА ДЛЯ ЧОППЕРА ТЯГОВОЇ ПІДСТАНЦІЇ ..... 113

*Рибак О. Б., Бабкін Г. В.*

МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ ЯК БАЗОВА СКЛАДОВА ПРОЦЕСУ ЇХ РОЗРОБКИ..... 116

|                                                                                                                                                                        |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <i>Дячков А. П., Бабкін Г. В.</i><br>МОДЕЛЮВАННЯ ЗАСОБІВ КЕРУВАННЯ МОБІЛЬНИХ ОБ'ЄКТІВ ПРИ РУСІ<br>У ВІРТУАЛЬНОМУ 3D-ПРОСТОРІ.....                                      | 121 |
| <i>Демідов І. А.</i><br>СТОХАСТИЧНА НЕПЕРЕДБАЧУВАНІСТЬ КУРСУ МРО ЯК ЗАСІБ ПРОТИДІЇ<br>ПРОГНОЗНОМУ СПОСТЕРЕЖЕННЮ .....                                                  | 125 |
| <i>Пустомельник В. С., Дьяконов О. С.</i><br>РОЗРОБКА НАВАНТАЖЕННЯ ЗМІННОГО СТРУМУ З МІКРОПРОЦЕСОРНИМ КЕРУВАННЯМ.....                                                  | 127 |
| <i>Грешнов А. Ю.; Стократян В. В.</i><br>ПЕРЕСУВНИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ПАЛИВНИХ РЕЧОВИН .....                                                         | 132 |
| <i>Гайдай Г. Ю., Лошиц В. Д.</i><br>МЕТРОЛОГІЧНЕ СУПРОВОДЖУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ТА РЕМОНТУ<br>ВІЙСЬКОВОЇ ТЕХНІКИ .....                                      | 135 |
| <i>Гайдай Г. Ю., Вартамян В. Е.</i><br>СТЕНД ДЛЯ ПЕРЕВІРКИ ГЕОМЕТРИЧНОЇ ТОЧНОСТІ ПОВІРОЧНИХ ПЛИТ .....                                                                 | 139 |
| <i>Мельнікова І. О., Черкасов А. О., Ясенко Д. А., Буряк В. С.</i><br>ПРОБЛЕМА НАРОЩУВАННЯ ТИПОВИХ ЛАНОК ПРИ ПОБУДОВІ СКЛАДНИХ СИСТЕМ<br>АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ..... | 142 |
| <i>Руднік А. А., Мадінов М. Л., Шкітов А. А., Лацик Н. С.</i><br>ФАКТОРИ ЗАГРОЗ ФУНКЦІОНУВАННЯ SCADA-СИСТЕМ В АВТОМАТИЗОВАНИХ<br>ВИРОБНИЧИХ КОМПЛЕКСАХ.....            | 147 |

*Наукове видання*

## **АВТОМАТИКА ТА ЕЛЕКТРОТЕХНІКА**

### **МАТЕРІАЛИ**

Всеукраїнської науково-технічної конференції студентів,  
аспірантів та молодих вчених

*4–5 грудня 2025 року*

*(українською та англійською мовами)*

Відповідальний за випуск **О. О. Пальчиков**  
Комп'ютерна верстка **О. О. Пальчиков, Н. М. Ковальчук**

---

Формат 60×84/8. Ум. друк. арк. 17,79. Вид. № 41. Зам. № 1401-01.  
Видавець і виготівник: Національний університет кораблебудування  
імені адмірала Макарова  
просп. Героїв України, 9, м. Миколаїв, 54007  
E-mail : [publishing@nuos.edu.ua](mailto:publishing@nuos.edu.ua)  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 6402 від 19.09.2018 р.