

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова

СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ АВТОМАТИКИ ТА ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ СПАЕ-2025

МАТЕРІАЛИ ВСЕУКРАЇНСЬКОЇ НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ

29-30 квітня 2025 року

Навчально-науковий Інститут автоматики і електротехніки
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
м. Миколаїв, проспект Центральний, 3

МАТЕРІАЛИ



Миколаїв 2025

УДК 681.5:621.3
С91

Сучасні проблеми автоматики та електротехніки СПАЕ-2025: Матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції [Електронний ресурс]. – Миколаїв: НУК, 2025. – 126 с.

У збірнику подані матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції "Сучасні проблеми автоматики та електротехніки СПАЕ-2025".

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.

ОРГАНІЗАТОРИ:

1. МОН України;
2. Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова.

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

Комп'ютерна верстка:
Відповідальний за випуск:

О.О. Пальчиков
О.О. Пальчиков

© Національний університет кораблебудування, 2025

ПЛЕНАРНА СЕКЦІЯ

УДК 621.317.31

Верещаго Є.М., к. т. н., Джангіров М.В., Єременко А.П.

Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, м. Миколаїв

МОДЕЛЮВАННЯ ДАТЧИКІВ СТРУМУ У ДЖЕРЕЛАХ ЖИВЛЕННЯ З ЦИФРОВИМ КЕРУВАННЯМ ДЛЯ ПЛАЗМОТРОНІВ

Датчики струму є важливими компонентами в джерелах живлення для зварювання. Вони відіграють ключову роль у захисті обладнання, підвищенні ефективності, підтримці контролю якості та оптимізації процесів.

Для забезпечення стабільного та якісного зварного шва необхідний точний контроль струму. Датчики струму надають зворотний зв'язок у реальному часі щодо фактичного струму, що подається до зварювальної дуги, дозволяючи джерелу живлення коригувати та підтримувати необхідний рівень струму. Крім того, вони допомагають захистити джерело живлення та зварювальне обладнання від пошкоджень, виявляючи аномальні умови, такі як перевантаження по струму або коротке замикання. У разі потреби вони можуть ініціювати захисні дії, наприклад, вимкнення джерела живлення або активацію захисних схем.

Завдяки контролю струму джерело живлення може оптимізувати свою роботу для досягнення максимальної ефективності, зменшуючи споживання енергії та мінімізуючи виділення тепла – що особливо важливо при зварюванні з високою потужністю.

Дані, зібрані датчиками струму, є надзвичайно цінними для контролю якості. Аналіз профілів струму успішних зварювань допомагає встановити еталонні показники для майбутніх операцій. Відхилення від цих еталонів можуть свідчити про потенційні проблеми зі зварним швом.

Крім того, датчики струму сприяють оптимізації технологічного процесу. Наприклад, при контактному зварюванні профіль струму впливає на розмір і форму зварної точки. Завдяки контролю та моніторингу струму можна оптимізувати характеристики зварної точки відповідно до вимог конкретного застосування [1].

Наразі на ринку представлені моделі різних фірм, які можуть використовуватися в джерелах живлення для зварювання. Серед ключових характеристик, що впливають на вибір датчика, виділяють такі: максимальний діапазон вимірюваних струмів, смуга пропускання, точність, тип вихідного сигналу, технологія виготовлення, розміри [1, 2].

Враховуючи все вищезначене є доцільним і актуальним використання цифрових систем керування у джерелах живлення для зварювання [3].

Метою роботи є моделювання ланцюгу «датчик струму» - «сігма-дельта модулятор» - «цифровий фільтр» та аналіз цифрових фільтрів, які можуть використовуватися для отримання точного цифрового представлення аналогового сигналу струму.

Цифрове керування відрізняється від аналогового підходу не лише засобами реалізації, але й принципами функціонування, гнучкістю, точністю й адаптивністю до змін умов роботи. Основні відмінності в проектуванні цифрових систем керування можна класифікувати за кількома критеріями:

- 1) Обробка сигналу. Аналогове керування працює безперервно в реальному часі, обробляючи аналогові сигнали без оцифровки. Цифрове керування потребує дискретизації сигналу за допомогою аналогово-цифрового перетворювача (АЦП), обробки даних мікроконтролером або цифровим сигнальним процесором (ЦСП), і, за потреби, цифро-аналогового перетворювача (ЦАП) для зворотного перетворення.
- 2) Гнучкість і адаптивність. У цифровому керуванні алгоритми легко змінюються через перепрограмування, тоді як в аналоговому всі зміни вимагають фізичного втручання (заміни компонентів).
- 3) Прецизійність і шумозахищеність. Цифрові системи менш чутливі до шуму, ніж аналогові, особливо в середовищах із високими імпульсними перешкодами, що характерно для силової електроніки. Точність цифрового керування обмежується розрядністю АЦП/ЦАП, але вона може бути достатньо високою (12–16 біт і більше).
- 4) Можливості обчислення. Цифрові контролери можуть виконувати складні математичні обчислення в реальному часі, включаючи оптимізацію, фільтрацію сигналу, ПІД- або адаптивні регулятори. Це дозволяє впроваджувати складні функції регулювання.
- 5) Швидкодія. Аналогове керування зазвичай швидше через відсутність дискретизації та обчислень. Проте сучасні ЦСП і мікроконтролери з високими тактовими частотами забезпечують достатню швидкодію для більшості застосувань, включаючи високочастотні перетворювачі.
- 6) Вартість і складність. Аналогові системи можуть бути дешевшими і простішими для реалізації в базових схемах. Цифрові ж – складніші в початковому проектуванні, але знижують витрати на підтримку і модифікації в довгостроковій перспективі.

Цифрове керування дає змогу реалізувати точну, адаптивну та функціонально насичену систему керування перетворювачем. Воно відкриває можливість динамічного обчислення керуючих сигналів у режимі реального часу

та автоматичного реагування на зміни вхідних/вихідних параметрів. Ці переваги роблять цифровий підхід найбільш доцільним вибором для складних і вимогливих задач у сучасній силовій електроніці.

На рисунку 1 показано традиційне рішення для вимірювання за допомогою АЦП, яке зазвичай використовується в сучасних джерелах живлення. У цій конфігурації аналоговий низькочастотний фільтр знижує високочастотні шуми сигналу, а для забезпечення гальванічної розв'язки може додатково використовуватись ізолюючий підсилювач. Перетворення сигналу здійснюється в АЦП, який вбудований в ЦСП. Вибірка сигналу за допомогою такого традиційного рішення, як правило, супроводжується шумами, особливо в умовах високих електромагнітних завад, що є типовими для потужних джерел живлення. Придушення шумів може здійснюватися як за допомогою цифрових, так і аналогових фільтрів, але обидва варіанти спричиняють затримку [4]. Ця затримка може впливати на цифрову систему керування, зменшуючи її стійкість та погіршуючи динамічні властивості.

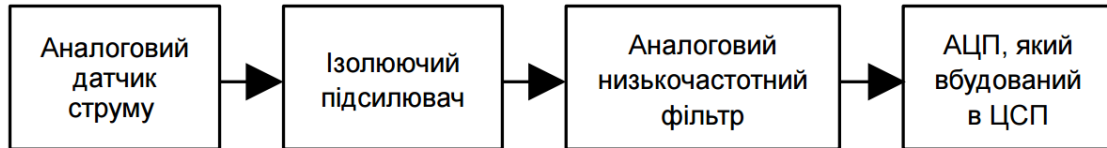


Рисунок 1 – Структурна схема вимірювання струму за допомогою АЦП, вбудованого в ЦСП

Щоб вирішити проблеми, притаманні традиційним АЦП, на рисунку 2 представлена типова схема вимірювання з використанням сігма-дельта АЦП. За потреби може використовуватись аналоговий фільтр низьких частот для зменшення високочастотних шумів перед подачею сигналу на сігма-дельта модулятор. Він перетворює аналоговий сигнал у цифровий потік, який може передаватися через оптичний інтерфейс до цифрового входу ЦСП, забезпечуючи гальванічну розв'язку та фізичне розділення. У ЦСП застосовується цифровий фільтр, який прибирає шуми квантування та високочастотні шуми і відновлює еквівалентний вимірюваний сигнал [4].



Рисунок 2 – Структурна схема вимірювання струму з використанням сігма-дельта АЦП

Розглянемо роботу сигма-дельта модулятора на прикладі датчика струму фірми LEM серії HO-NPW. Для вимірювання струму у ньому використовується датчик Холла без зворотного зв'язку, а аналогово-цифрове перетворення здійснюється за допомогою вбудованого сигма-дельта модулятора, що формує одnobітовий послідовний вихідний потік. Користувач сам завершує процес аналогово-цифрового перетворення, вибираючи фільтр для бітового потоку, що дозволяє досягти оптимального балансу між роздільною здатністю та часом відгуку відповідно до конкретного застосування [5].

Цей датчик використовує сигма-дельта модулятор другого порядку модель якого у середовищі Simulink представлена на рис. 3.

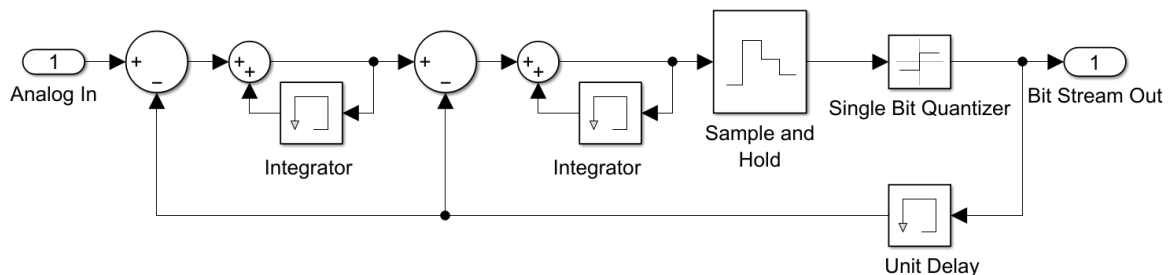


Рисунок 3 – Модель сигма-дельта модулятора другого порядку

У випадку сигма-дельта перетворювачів, що використовуються в датчиках LEM, аналоговий вхід зазвичай дискретизується з частотою приблизно 10,7 МГц, а цифровий вихід складається лише з одного біта. Тобто, замість багатобітного значення сигналу, як у традиційних АЦП з частотою Найквіста, сигма-дельта модулятор генерує потік одиничних бітів, який відображає, чи збільшується або зменшується сигнал у даний момент. Таким чином, на відміну від перетворювачів із частотою Найквіста, які забезпечують багатобітові вибірки з меншою частотою, сигма-дельта модулятор видає високошвидкісний потік із одного біта, який кодує сигнал впродовж часу. Оскільки кожен окремий біт містить дуже мало інформації, для точного відтворення вхідного значення необхідно обробити велику кількість бітів за допомогою цифрового низькочастотного фільтра. Цей процес ефективно усуває високочастотні шуми та спотворення, спричинені квантуванням сигналу, дозволяючи досягти високої роздільної здатності вимірювання навіть при використанні лише одного біта на виході.

У якості цифрового низькочастотного фільтра використовується SINC-фільтр порядку K . Фільтр першого порядку, який обробив N вхідних бітів, повертає на виході середнє значення цих бітів. Фільтр K -го порядку створюється шляхом послідовного з'єднання K фільтрів першого порядку [4, 6]. Як і у випадку з будь-яким фільтром, порядок та смуга пропускання вибираються для оптимізації продуктивності системи. Вузька смуга пропускання забезпечує найнижчий рівень шуму (або найвищу роздільну здатність), але при цьому зменшується швидкість відгуку і навпаки. Таким чином, під час проектування необхідно знаходити баланс між швидкістю і точністю/стабільністю вимірювань залежно від вимог конкретного застосування.

Моделювання роботи датчика струму з сигма-дельта модулятором для різних порядків SINC-фільтрів у середовищі Simulink зображено на рис. 4.

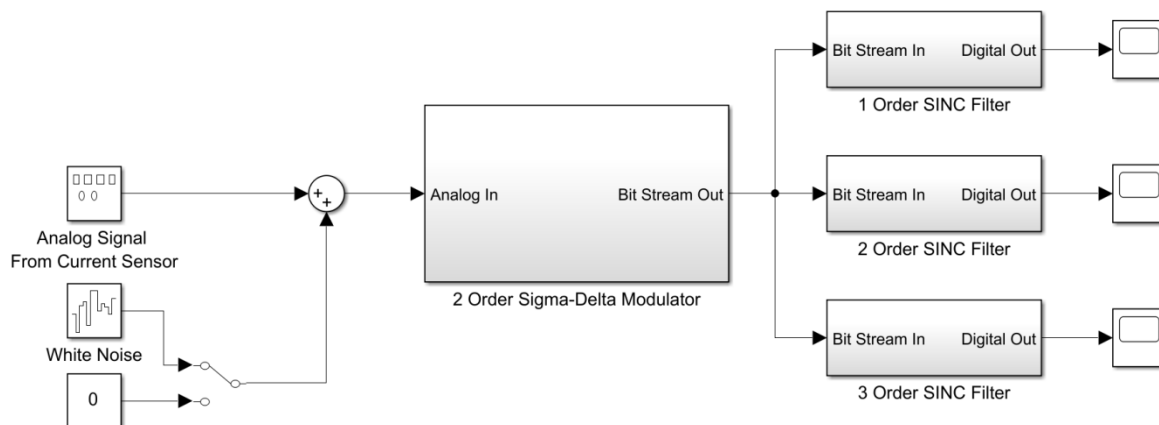


Рисунок 4 – Датчик струму з сигма-дельта модулятором та SINC-фільтри 1, 2 та 3 порядку

Висновки. Розроблена модель дозволяє досліджувати та аналізувати фільтри, що використовуються для отримання вихідного сигналу. Напрямами подальших досліджень можуть бути інші алгоритми цифрової обробки, що зможуть покращити швидкість вимірювань, забезпечуючи при цьому необхідну високу точність вихідного сигналу.

Список використаних джерел

1. Current measurement in industrial welding applications. URL: <https://www.lem.com/en/welding> (дата звернення: 06.04.2025).
2. Current-sensing solutions. URL: <https://www.ti.com/technologies/current-sensing-solutions.html> (дата звернення: 06.04.2025).
3. J. Deli, Y. Bo, An intelligent control strategy for plasma arc cutting technology, Journal of Manufacturing Processes, Volume 13, Issue 1, 2011, pp. 1-7.
4. Montes, O.A.; Dadzie, D.; Lukic, S.; Tu, H. Multisampling with Sigma-Delta ADCs for Medium-Voltage Cascaded H-Bridge Converters. Energies 2024, 17, 6156.
5. Digital Current Transducer HO-NPW series. URL: https://www.lem.com/sites/default/files/products_datasheets/ho-npw_series.pdf (дата звернення: 06.04.2025).
6. Digital Output Transducers and $\Sigma\Delta$ Conversion. URL: <https://www.lem.com/en/file/6811/download> (дата звернення: 06.04.2025).

УДК 621.3:681:5

Демідов І.А., Черно О.О., д.т.н.

Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, м. Миколаїв

АЛГОРИТМ ПОБУДОВИ ПЕРЕДАТОЧНОЇ ФУНКЦІЇ ДЛЯ ВІБРАЦІЙНИХ КОНВЕЄРІВ ІЗ ВРАХУВАННЯМ ХВИЛЬОВИХ ЕФЕКТІВ

У сучасних виробничих технологіях вібраційні машини відіграють ключову роль, забезпечуючи широкий спектр операцій — від вібраційного транспортування до інтегрованих процесів сепарації, сортування, сушіння та дозованої подачі матеріалів [1–3]. Якість і стабільність цих технологій гарантується застосуванням керованих електромагнітних вібраційних приводів, удосконалення яких залишається одним із пріоритетних завдань інженерної науки [4, 5]. При моделюванні довгих робочих органів віброконвеєрів традиційно використовують континуальні математичні й імітаційні підходи, що дозволяють точно відтворити розподіл параметрів уздовж довжини [6, 7]. Водночас для інтегрованого аналізу механічних коливань, електромагнітних явищ та алгоритмів керування більш ефективними виявляються дискретні моделі, які дозволяють реалізувати зворотний зв'язок у системах керування та враховувати реальні сигнали [8, 9].

Метою роботи стало створення спеціалізованої програми, яка автоматизує весь цикл аналізу коливальних процесів у вібраційній машині з керованим електромагнітним приводом, з урахуванням хвильових процесів та вібраційних деформацій у розподіленому робочому органі, на основі початкової континуальної імітаційної моделі.

Для реалізації поставленої мети було розроблено покроковий алгоритм, відображений на блок-схемі (рис. 1). Кожен етап відповідає певному блоку розрахунків у Mathcad-середовищі.

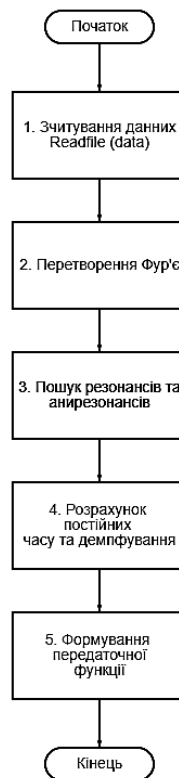


Рисунок 1 – Алгоритм обчислень параметрів коливальної системи

Блок 1. Зчитування даних Readfile(data)

На початковому етапі здійснюється імпорт вхідного сигналу з зовнішнього файлу (зокрема Excel), який містить часові відліки експериментального коливального процесу. Отримані дані зберігаються у вигляді вектора амплітуд $h[k]$, що відповідають часовим моментам $x[k]=k \cdot dt$. Частота дискретизації f_s та кількість відліків N визначають параметри побудови подальшої моделі.

Блок 2. Перетворення Фур'є

На цьому етапі використовується дискретне перетворення Фур'є:

$$H[m] = FFT(h[k]) \quad (1)$$

що дозволяє перейти від часової області до частотної. Отриманий спектр $H[m]$ є комплексним і містить інформацію про амплітуду й фазу коливань у частотному діапазоні. Для аналізу динамічних характеристик системи формується амплітудний спектр:

$$Amplitude[m] = \frac{|H[m]|}{N} \quad (2)$$

а також вектор кутових частот:

$$\omega[m] = 2\pi \cdot mN \cdot f_s \quad (3)$$

Блок 3. Пошук резонансів та анирезонансів

Пошук резонансів та анирезонансів із спектра автоматизовано виділяються локальні максимуми (резонанси) та локальні мінімуми (анирезонанси) на основі порогового аналізу. Частоти резонансів ω_i амплітуди зберігаються у масивах для подальших розрахунків. Це дозволяє здійснити структурну декомпозицію системи на її основні частотні моди [5, 10].

Блок 4. Розрахунок постійних часу та демпфування

Для кожної резонансної частоти ω_i визначається:

- Постійна часу T_i за формулою:

$$T = \frac{1}{\omega_r \sqrt{1 - \zeta^2}} \quad (4)$$

— де ζ_i — демпфуючий коефіцієнт.

- Коефіцієнт демпфування ζ_i обчислюється двома методами:

- спектральним:

$$\zeta = \frac{\Delta\omega}{2\omega_r} \quad (5)$$

- або часовим: через логарифмічний декремент.

Ці параметри відображають динамічні властивості кожної моди коливання.

Блок 5. Формування передаточної функції

На основі отриманих T_i та ζ_i формується передаточна функція виду:

$$W(p) = \frac{\prod_{j=1}^n (T_{2j}^2 p^2 + 2\zeta_{2j} T_{2j} p + 1)}{\prod_{i=1}^m (T_{1i}^2 p^2 + 2\zeta_{1i} T_{1i} p + 1)}, \quad (6)$$

або як послідовність коливальних і диференціюючих ланок другого порядку. Така модель дозволяє коректно описати реакцію системи на збурення та застосовується в середовищах моделювання (наприклад, Simulink) для дослідження перехідних процесів і розробки систем керування.

Така структура зручна для подальшого синтезу системи керування [2, 7, 9].

Висновки У роботі реалізовано алгоритм побудови дискретної моделі вібраційної машини з урахуванням хвильових процесів. Запропоновано послідовність дій, що дозволяє за результатами континуальної симуляції сформулювати передаточну функцію, яка відображає динаміку системи в частотній та часовій областях. Отримані результати можуть бути використані як для аналізу, так і для побудови ефективних систем керування.

Список використаних джерел

1. Грабовський В.Я. Теорія механізмів та машин. – Львів: Видавництво ЛНУ, 2009.
2. Ogata K. Modern Control Engineering. – Prentice Hall, 2010.
3. Колесник С.А. Теорія вібрацій. – Київ: НАУКМА, 2016.
4. Шевчук В.Ф. Динаміка машин. – Київ: Вища школа, 2002.
5. Den Hartog J.P. Mechanical Vibrations. – Dover Publications, 1985.
6. Мороз В.М. Континуальні моделі в динаміці машин. – Київ: НАН України, 2015.
7. Кузнєцов В.В. Системи автоматичного керування. – Харків: НТУ «ХПІ», 2012.
8. Franklin G.F., Powell J.D., Emami-Naeini A. Feedback Control of Dynamic Systems. – Pearson, 2019.
9. Astrom K.J., Murray R.M. Feedback Systems: An Introduction for Scientists and Engineers. – Princeton University Press, 2008.
10. Rao S.S. Mechanical Vibrations. – Pearson, 2017.

УДК 681.5

Льовкін В.С., аспірант кафедри автоматики, Білюк І.С., к.т.н., доцент кафедри автоматики, Савченко О.В. викладач кафедри автоматики

Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, м. Миколаїв

ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ ХВИЛЬОВОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ

Серед відновлювальних джерел енергії морські хвилі розвивають найбільшу питому потужність. Використання лише певної частки сукупної енергії хвиль Світового Океану для виробництва електроенергії досить для істотного збільшення цього виробництва без нанесення будь-якої шкоди екосистемі планети. Тому питання розробки перетворювачів енергії хвиль є актуальним і перспективним [1, 2].

Одним з найбільш розповсюджених пристроїв для отримання електричної енергії з енергії хвиль є хвильові електростанції (ХвЕС). Хвильові електростанції – перспективне джерело екологічно чистої енергії, розробці яких приділяється велика увага. Створення ХвЕС визначається вибором оптимальної конструкції станції відповідно до умов акваторії використання.

Мета роботи. Метою цієї роботи є розробка імітаційної моделі електромеханічного перетворювача ХвЕС.

Основним елементом для перетворення енергії морських хвиль в електричну енергію в хвильовій електростанції типу морського буя є лінійний генератор.

Його конструктивна схема представлена на рисунку 1.

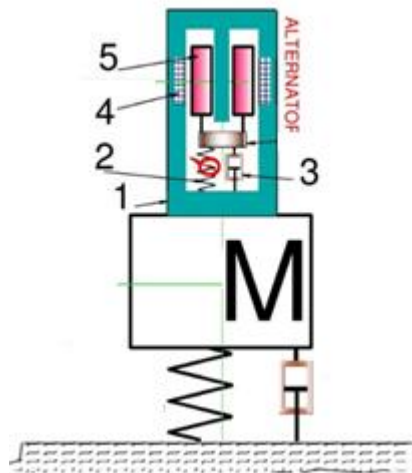


Рисунок 1 – Електромеханічний перетворювач ХвЕС:

1 – корпус; 2 – пружина; 3 – демпферний елемент; 4 – котушка; 5 – магніт.

Використання постійних магнітів дозволяє покращити масогабаритні показники генератора, відмовитися від передачі на рухому частину (індуктор) електричної енергії та при роботі з підвищеними немагнітними зазорами забезпечувати високі питомі енергетичні показники машини.

Найбільш перспективні лінійні генератори невеликих потужностей для перетворення енергії хвиль, механічних коливань для підзарядки акумуляторів автономних рухомих пристроїв, як електромагнітні амортизатори та дисипатори енергії.

Для дослідження процесу електромеханічного перетворення енергії в лінійному генераторі будемо вважати, що зовнішні збурювальні коливання носять синусоїдальний характер.

З урахуванням зворотно-поступального руху індуктора розроблено імітаційну модель перетворювача енергії коливань на основі трифазного лінійного генератора з постійними магнітами (рис. 2). Вона включає силові блоки, блоки вимірювання електричних величин – напруги та струму в генераторі та навантаженні після випрямлення, а також віртуальні осцилографи візуалізації результатів розрахунку.

Результати моделювання представлено на рисунку 3.

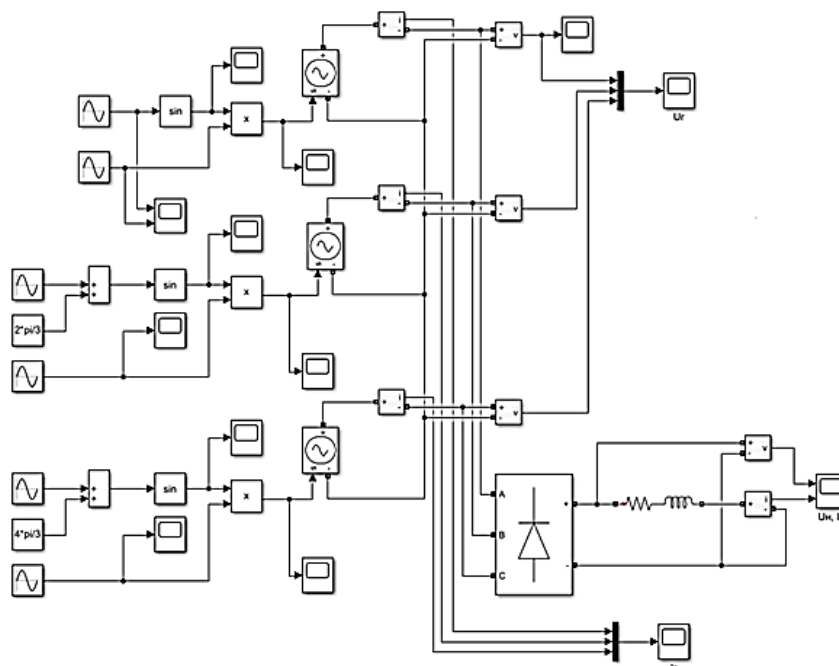


Рисунок 2 – Імітаційна модель електроємного механічного перетворювача

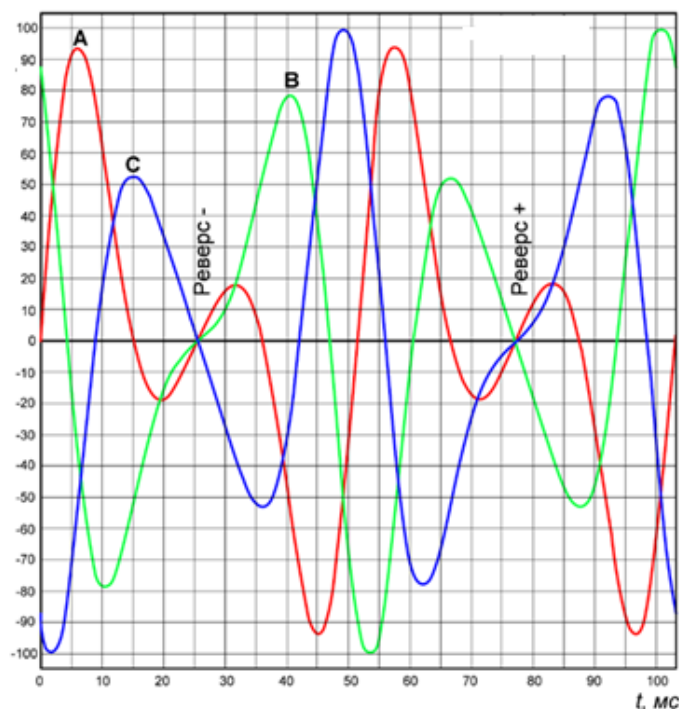


Рисунок 3 – Результати моделювання процесів в електромеханічному перетворювачі

Висновки. Запропонована модель дозволяє аналізувати роботу хвильової електростанції в умовах стохастичного характеру зміни швидкості морських хвиль. Через нестабільність параметрів електричної енергії, що генерується, її використання доцільне після випрямлення та акумулювання у спеціальних пристроях.

Список використаних джерел

1. Joao Cruz Ocean Wave Energy: Current Status and Future Perspectives. – Springer, 2008. – 431 pages.
2. Ocean Energy Strategic Roadmap 2016, building ocean energy for Europe. Ocean Energy Forum. 2016 [Electronic resource], 2016 URL: https://webgate.ec.europa.eu/maritimeforum/sites/maritimeforum/files/OceanEnergyForum_Roadmap_Online_Version_08Nov2016.pdf
3. Nerubenko, G., Blintsov, V., Mozgovyy, A., Biliuk, I., The Novel Wave Energy Harvesting Buoy. Proc. of the 5th International Conference on Power Generation Systems and Renewable Energy Technologies (PGSRET), 26-27 August 2019, Turkey. 6 pages.

УДК 621.313.8

Пальчиков О.О., к.т.н.

Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, м. Миколаїв

ДИНАМІКА СИНХРОННОГО ДВИГУНА В СКЛАДІ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ РОБОТА ЦИЛІНДРИЧНОЇ СИСТЕМИ КООРДИНАТ

Синхронні двигуни з постійними магнітами (СДПМ) є альтернативою як асинхронним, так і колекторним двигунам в системах автоматизованого електропривода. За енергетичними параметрами СДПМ значно переважають свої аналоги постійного і змінного струму [1], а порівняно з колекторними двигунами мають підвищену надійність завдяки відсутності колекторно-щіткового вузла. Велика кількість сучасних публікацій [2-8], присвячених СДПМ і системам на їх основі, показує актуальність дослідження теорії функціонування і регулювання СДПМ. Зважаючи на область застосування СДПМ, оцінку їх динамічних властивостей необхідно проводити з врахуванням змінних механічних навантажень і наявності вищих гармонік струму в обмотках якоря, викликаних інвертором.

Ціль роботи – дослідити динаміку СДПМ на основі його представлення системою рівнянь, записаних у вісях d і q , при живленні від інвертора напруги і при механічних навантаженнях, що характерні для привода повороту колони робота з одночасним горизонтальним видовженням його руки.

Рівняння СДПМ з синусоїдальною зворотною хвилею електрорушійної сили в обмотках якоря можна отримати з рівнянь традиційної синхронної машини, і ці рівняння ідентичні до рівнянь наведених в [2, 5-7]. Інвертор напруги моделюється як два джерела синусоїдальної напруги, які керуються трьома компараторами на основі релейних елементів. Вхідні сигнали системи керування інвертором – струми в кожній з трьох фаз СДПМ, кутове положення ротора СДПМ, а також сигнал від регулятора швидкості. В якості механічного навантаження

оберемо механізм кутового переміщення колони робота *Seiko RT 3200* (рис. 1). Для узгодження кутових швидкостей вала СДПМ і механізму повороту колони передбачено ідеальний редуктор з коефіцієнтом передачі 45. Механічна система, приведена до вала СДПМ, описується рівнянням

$$J_{\Sigma} \ddot{\phi} = M - M_{\text{опору}} - M_K,$$

де $\ddot{\phi}$ – кутове прискорення ротора двигуна; M , $M_{\text{опору}}$, M_K – моменти двигуна, опору обертанню колони робота і сил Коріоліса відповідно; J_{Σ} – сумарний момент інерції, що з деякими спрощеннями залежить від моменту інерції двигуна $J_{\text{дв}}$, мінімально можливого моменту інерції механізму колони J_{Pmin} , маси навантаження m_n , мінімального ρ_{min} і поточного ρ вильотів руки робота і визначається

$$J_{\Sigma} = J_{\text{дв}} + (J_{\text{Pmin}} + m_n(\rho - \rho_{\text{min}})^2)/l^2.$$

Момент опору механізму переміщення приведений до вала двигуна визначається

$$M_{\text{опору}} = (M_{\text{ухл}} + M_B + M_{\text{тр}})l_i,$$

де $M_{\text{ухл}}$, M_B , $M_{\text{тр}}$ – моменти статичних опорів відносно вісі обертання колони робота від ваги колони робота разом з вантажем при знаходженні робота на ухилі, від вітрового навантаження, від сил тертя відповідно, які визначаються наступними виразами:

$$M_{\text{ухл}} = (m_{\text{пов}}l_{\text{пов}} + m_n\rho)g \cdot \sin\alpha;$$

$$M_B = F_K^p r_B + F_n^p \rho;$$

$$M_{\text{тр}} = 0,5(F_A f_A d_A + F_B f_B d_B + F_C f_C d_C).$$

В цих виразах використані наступні величини: $m_{\text{пов}}$ – маса поворотної частини робота (складається з маси власне башти m_B , противаги $m_{\text{пв}}$, руки робота m_p); $l_{\text{пов}}$ – відстань від вісі колони робота до центра ваги поворотної частини робота (можна визначити, якщо відомі маси окремих частин поворотної частини робота m_B , $m_{\text{пв}}$, m_p , а також відстані від вісі колони робота до їх центра ваги l_B , $l_{\text{пв}}$, l_p за виразом $l_{\text{пов}} = (m_B l_B + m_{\text{пв}} l_{\text{пв}} + m_p l_p) / m_{\text{пов}}$); g – прискорення сили тяжіння; α – кут нахилу поворотного переміщення колони робота (зазвичай приймається $\alpha = 1 \dots 2^\circ$); F_K^p , F_n^p – вітрові навантаження на колону робота і навантаження відповідно (у приміщенні можна цими навантаженнями нехтувати); r_B – відстань від вісі обертання до центра ваги площі повітряної поверхні робота; F_A , F_C – навантаження в підшипниках, які сприймають переважно радіальні навантаження, і які обернено пропорційні відстані h між цими підшипниками (можна визначити як $F_A = F_C = (m_{\text{нр}} + m_B l_B + m_p l_p - m_{\text{пв}} l_{\text{пв}})g/h$); F_B – навантаження в підшипнику (вага поворотної частини), який сприймає переважно осеві навантаження; f_A , f_B , f_C – коефіцієнти тертя в підшипниках (для шарикових і роликових підшипників становить 0,015); d_A , d_B , d_C – діаметри цапф опор (для наближених розрахунків існують емпіричні формули $d_A = d_C \approx 0,07h$ і $d_B = (0,6 \dots 0,7)d_A$).

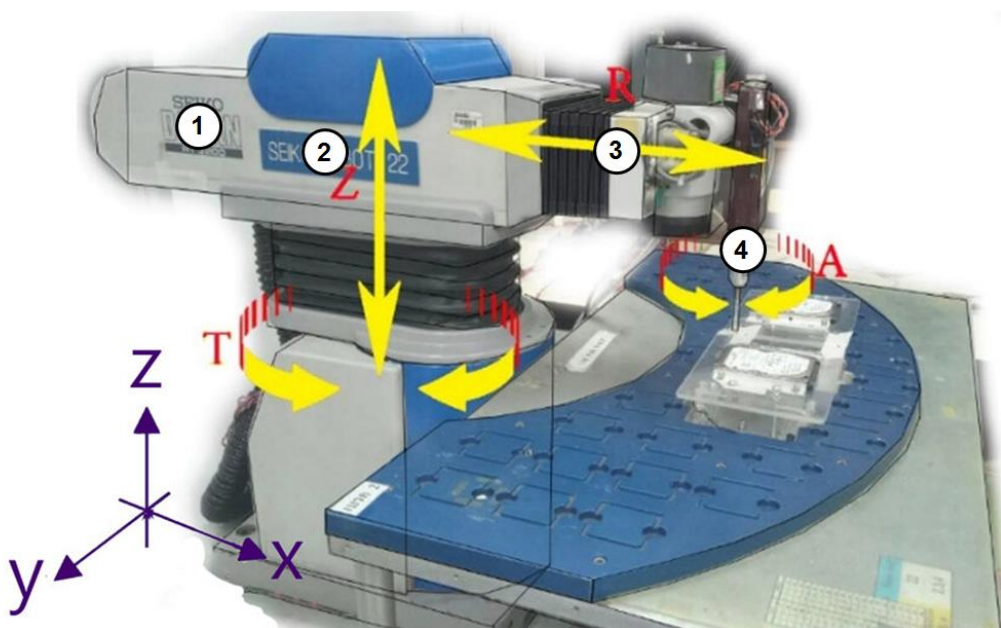


Рисунок 1 – Загальний вид робота *Seiko RT 3200*:
1 – противага; 2 – башта; 3 – рука; 4 – навантаження.

Момент сил Коріоліса, приведений до вала двигуна, перешкоджає руху при горизонтальному переміщенні навантаження від вісі обертання і сприяє руху при горизонтальному переміщенні вантажу до вісі обертання

$$M_k = 2m_{np} \dot{\varphi} l i,$$

де $\dot{\varphi}$ – кутова швидкість обертання вала двигуна.

В якості СДПМ обрано двигун китайського виробництва типу JPM100L30-3. Технічні дані якого наведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Паспортні дані двигуна JPM100L30-3

P_2 , кВт	p	f , Гц	M , Н·м	U_N , В	I , А	η
3	3	150	9,55	380	5,18	0,926

На основі табл. 1 та моделі СДПМ в *Matlab* з контуром регулювання за швидкістю були визначені необхідні параметри моделі неявнополюсного СДПМ, які в подальшому використовувалися для дослідження динаміки двигуна в складі електропривода повороту колони робота. Ці параметри зведені до табл. 2. Критерієм відповідності моделі і двигуна JPM100L30-3 була збіжність моменту, кутової швидкості, фазного струму і лінійної напруги. Перші три параметра моделі співпали з оригіналом, а лінійна напруга склала 99,516% (що з врахуванням вищих гармонічних струму, викликаних роботою інвертора напруги, цілком прийнятна точність). Значення моменту інерції ротора СДПМ було прийнято на рівні відомих аналогів.

Таблиця 2 – Розраховані параметри моделі двигуна

R , Ом	L , Гн	Ψ , В·с	J_{dv} , кг·м ²
1	0,012	0,3081	$1,469 \cdot 10^{-3}$

Так як модель СДПМ, представлена у вісях d і q , дозволяє визначити лише електромагнітний момент без врахування магнітних втрат у якорі, то двигун в моделі необхідно додатково навантажити моментом, що враховує магнітні втрати в якорі і механічні втрати в роторі. Момент магнітних і механічних втрат можна з достатньою точністю прийняти пропорційним добутку номінального моменту цих втрат і відношення поточної і номінальної кутових швидкостей ротора СДПМ

$$M = (P_m + P_{mx}) / \dot{\varphi} = k_m \dot{\varphi}^{0.4 \dots 1} + k_{mx} \dot{\varphi}^2 \approx k_{\Sigma} \dot{\varphi}.$$

Для моделювання динаміки СДПМ електропривода повороту колони при одночасному збільшенні вильоту руки робота приймалося, що сумарний момент інерції системи незмінний і становить $J_{\Sigma} = 2,469 \cdot 10^{-3}$ кг·м², приведений момент опору обертання колони оцінено, як $M_{опору} = 0,2$ Н·м, а інші параметри відповідають технічним характеристикам робота *Seiko RT 3200* і мають наступні значення: максимальне кутове переміщення – 300°, швидкість горизонтального переміщення навантаження – $\dot{r} = 1$ м/с, межі горизонтального переміщення вантажу – $r = 0,05 \dots 0,355$ м. Виходячи з умов не перевищення середньоквадратичного моменту значення номінального моменту і практичної відсутності коливань було налаштовано ПД регулятор положення з обмеженням вихідного сигналу на рівні ± 30 та з передаточною функцією

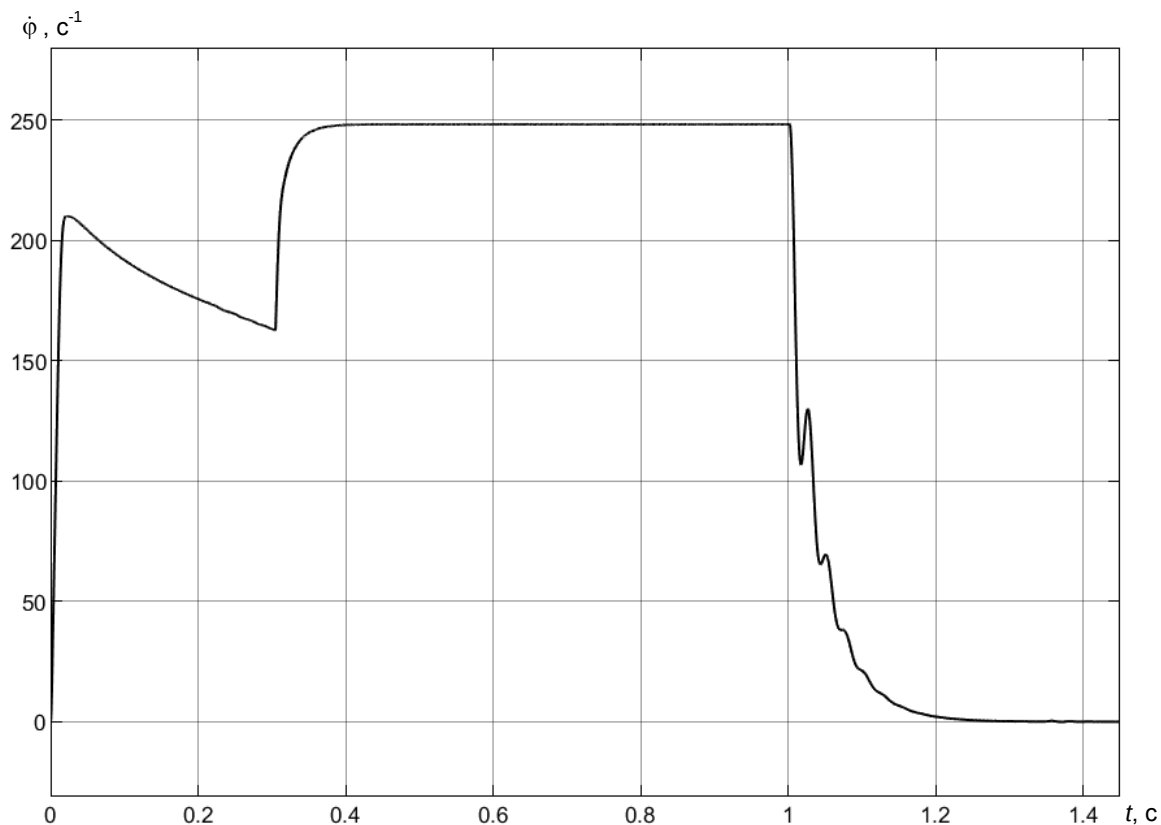
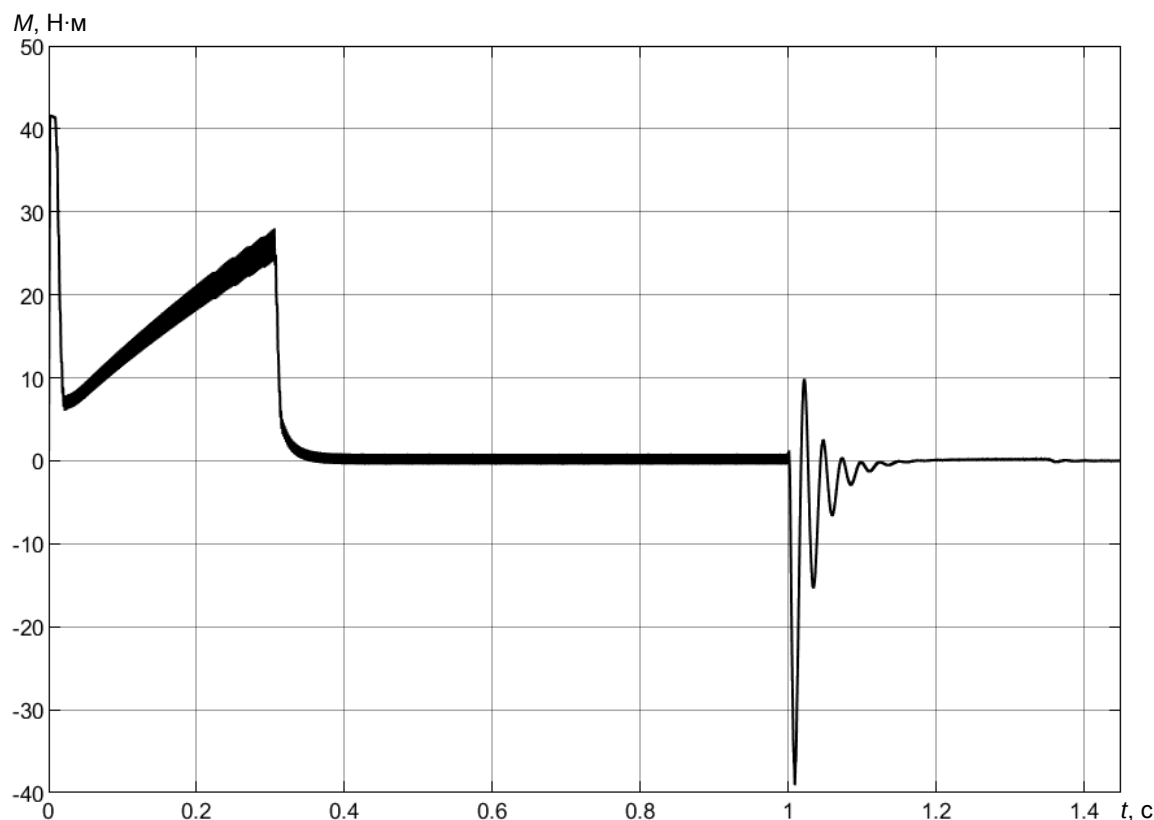
$$W_{ПД} = 20 + 0,7p.$$

Результати моделювання динаміки СДПМ привода повороту колони робота при одночасному горизонтальному видовженні його руки на основі розробленої моделі в *Matlab* наведені на рис. 2-3.

Відповідно до рис. 1, можна бачити, що максимальна кутова швидкість вала двигуна складає 248 с⁻¹, це за відсутності підпорядкованого контура швидкості досягалось за рахунок зниження вихідної напруги інвертора.

Відповідно до рис. 2-3 можна виділити чотири характерні області: пуску, сумарної дії моменту опору обертання колони і моменту Коріолісових сил, які викликані горизонтальним переміщенням від вісі вантажу, дії виключно моменту опору обертання колони, гальмування. На кривій перехідного процесу за моментом друга і третя область характеризуються високочастотними коливаннями, які накладаються на постійну складову моменту. Вищезгадані коливання моменту викликані впливом інвертора. За період 1,45 с значення середнього інтегрального квадратичного моменту двигуна склало 9,363 Н·м. Вплив регулятора положення в розглянутій системі відчувається лише в області гальмування двигуна.

Тож, характерні особливості роботи СДПМ в складі електропривода повороту колони робота з урахуванням одночасного переміщення навантаження від вісі назовні – це різка зміна моменту від 4-х кратного значення до практично нульового, а також коливання спричинені вищими гармоніками струму, що протікають в обмотках якоря двигуна.

Рисунок 2 – Залежність кутової швидкості вала СДПМ за період переміщення колони на кут 300° Рисунок 3 – Залежність моменту на валу СДПМ за період переміщення колони на кут 300°

Висновки. Розроблена математична модель динаміки електропривода повороту колони робота, яка складається з підсистеми інвертора (представленого як два керовані джерела напруги), СДПМ (представленого системою рівнянь у вісях d і q), механічного навантаження (сума моментів опору, Коріоліса, механічних і магнітних втрат), а також ПД-регулятора кута повороту колони. Модель двигуна відрізняється від існуючих моделей,

представлених в [2, 5-7], хоча і наближеним, але врахуванням механічних і магнітних втрат в СДПМ. Отримані залежності моменту на валу та кутової швидкості вала від часу СДПМ, як елемента електропривода повороту колони робота циліндричної системи координат.

Список використаних джерел

1. Lindegger M. Economic viability, applications and limits of efficient permanent magnet motors. – Switzerland: Swiss Federal Office of Energy, 2009. – 31 p.
2. Kiran Y., Puttaswamy P.S. Field oriented control of a permanent magnet synchronous motor using a DSP. – International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering, 2014, Vol. 3. – P. 12364-12378. DOI: 10.15662/ijareeie.2014.0310008
3. Reigosa D., Fernandez D., Gonzalez C., Lee S.B., Briz F. Permanent magnet synchronous machine drive control using analog hall-effect sensors. – IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, Vol. 54. – P. 2358-2369. DOI: 10.1109/TIA.2018.2802950
4. Rasmussen H., Vadstrup P., Borsting H. Sensorless field oriented control of a PM motor including zero speed. – IEEE International Electric Machines and Drives Conference, Madison, WI, USA, 2003, Vol. 2, IEMDC'03. – P. 1224-1228. DOI: 10.1109/IEMDC.2003.1210396
5. Kechiche O.B., Sethom H.B., Sammoud H., Belkhdja I.S. Optimized high frequency signal injection based permanent magnet synchronous motor rotor position estimation applied to washing machines. – American J. of Engineering and Applied Sciences, 2011, Vol.4 (3). – P. 390-399. DOI: <https://doi.org/10.3844/ajeassp.2011.390.399>
6. Wilcken N., Grotjahn M. Rotor position estimation for permanent magnet synchronous machines using electromotive force and anisotropy using Extended-Kalman-Filter. – Forschung im Ingenieurwesen, 2023, Vol. 87(2). – P. 1-10. DOI:10.1007/s10010-023-00660-z
7. Pramod P. Position sensing errors in synchronous motor drives. – Control Systems Engineering, 2023, October 02. – P. 1-16. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2310.00977>
8. Strobl S. Field oriented control (FOC) of permanent magnet synchronous machine (PMSM). – Imperix, TN111, 2021. <https://imperix.com/doc/implementation/field-oriented-control-of-pmsm>

СЕКЦІЯ 1. ІМПУЛЬСНІ ПРОЦЕСИ І ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 622.4:621.3

А.П. Малюшевська, В.І. Гунько, І.А. Перекупка, О.Д. Танасова
Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України, м. Миколаїв

АДАПТАЦІЯ ЗАНУРЮВАЛЬНОЇ ЧАСТИНИ ЕЛЕКТРОРОЗРЯДНОГО ПРИСТРОЮ ДЛЯ ОБРОБКИ ВЕРТИКАЛЬНИХ НАФТОВИХ СВЕРДЛОВИН ДО УМОВ РОБОТИ В ГОРИЗОНТАЛЬНИХ СВЕРДЛОВИНАХ

Суттєвою особливістю поточного стану розробки нафтових та газових родовищ є стійка тенденція до погіршення структури запасів і необхідності залучення в розробку складно-побудованих покладів.

Разом із застосуванням новітніх методів і матеріалів при обробці привибійної зони вертикальних і похило спрямованих свердловин, починаючи з 90-х років ХХ століття, широко впроваджується технологія будівництва горизонтальних свердловин. Розробка нафтових родовищ із використанням пологих, горизонтальних і розгалужено-горизонтальних свердловин є одним із пріоритетних напрямків в нафтогазовидобувній галузі із залучення в промислову розробку важко видобувних запасів нафти вже протягом останніх років, тобто до теперішнього моменту питання підвищення ефективності розробки нафтових покладів в частині відновлення продуктивності привибійної зони стає злостоденним [1].

Одним із ефективних методів відновлення продуктивності привибійної зони свердловин за результатами діяльності ІІПТ НАН України визнаний електророзрядний [2]. Застосування електророзрядного методу та пристрою для його здійснення дозволяє очищати зони перфорації, фільтри свердловин, підвищити проникність привибійної зони свердловини. Однак, пристрій для здійснення електророзрядного впливу призначений для обробки привибійних зон виключно вертикальних свердловин, а способом доставки пристрою в привибійну зону є занурення за рахунок гравітаційних сил. До теперішнього часу адаптація електророзрядного пристрою до умов обробки привибійних зон горизонтальних свердловин не була проведена і пошук науково-технічних рішень щодо її реалізації є актуальним [3,4].

Необхідно відзначити, що при бурінні всі свердловини з різних причин в тій чи іншій мірі відхиляються від спочатку заданого напрямку. Цей процес називається викривленням. Ненавмисне викривлення називається природним, а викривлення свердловин за допомогою різних технологічних і технічних прийомів - штучним. У ряді випадків викривлення свердловин дозволяє значно знизити витрати коштів і часу при розробці родовищ нафти і газу, тоді процес викривлення розвивають і називають його скерованим бурінням, яке може бути визначено як буріння свердловин із використанням закономірностей природного викривлення і за допомогою технологічних прийомів і технічних засобів для виведення свердловини в задану точку.

Розвиток нафтодобування за допомогою горизонтальних, пологих та розгалужено-горизонтальних свердловин ініціював не тільки стрімке зростання кількості технічних рішень щодо улаштування (буріння) такого роду об'єктів, але і появу багатьох пристроїв та обладнання для їх експлуатації. Численні компанії, що здійснюють сервісне обслуговування нафтових свердловин, користуються оригінальними пристроями із доставки обладнання каналами складної геометрії, забезпечують надійний електричний зв'язок та електронне управління процесами дослідження та експлуатації горизонтальних, пологих та розгалужено-горизонтальних свердловин. Але попередні пошуки не дозволили знайти інформації щодо наявності технічних рішень, які дозволять одночасно гарантувати проходження великих імпульсних струмів між елементами обладнання та механічну цілісність обладнання під час примусового проходження каналом складної геометрії при жорстких зовнішніх впливах (підвищених гідростатичного тиску і температури).

Для свердловин встановлені геометричні обмеження викривлення - великий (від 500 до 290 м), середній (від 290 до 50 м) та малий (від 50 до 6 м) радіуси викривлення.

Крім того, ствол свердловини викривляється не з постійною інтенсивністю за дугою кола, а зі змінною. Таким чином, забезпечення проникнення в привибійну зону горизонтальної свердловини приладів і обладнання є непростим інженерним завданням, а в разі використання електророзрядного методу змушує передбачати не тільки змінну геометрію занурювальної частини, але також її сполучення із засобом примусової доставки.

Існуючі електророзрядні пристрої для впливу на привибійну зону нафтових та газових свердловин, які створено в ІІПТ НАН України, типа Скіф - 100, містять електрично зв'язані наземне джерело живлення, вантажонесучий геофізичний кабель, пов'язаний із занурювальною частиною пристрою, яка незмінно містить послідовно механічно та електрично з'єднані модулі блоку електродної системи, блоку комутатора, блоку накопичувача електричної енергії із двох високовольтних імпульсних конденсаторів ІКП-30-1,2, зарядного блоку і призначені виключно для експлуатації у вертикальному робочому положенні та допускають експлуатацію при температурі навколишнього середовища до 100 °С і гідростатичному тиску до 50 МПа.

Блоки занурювальної частини пристрою жорстко скріплені між собою та загальна довжина занурювальної частини при зовнішньому діаметрі 101,6 мм становить близько 5,092 м і така конструкція суттєво обмежує можливість проходження горизонтальних свердловин.

Таким чином, важливим завданням є розробка гнучкого приєднувального пристрою, що дозволить надійно з'єднати всі елементи блоку ємнісних накопичувачів та модулі пристрою, дасть змогу змінювати геометрію блоку високовольтних імпульсних конденсаторів і при цьому не ушкодить навантажені сильними імпульсними струмами електричні з'єднання між частинами обладнання.

Метою роботи є адаптація існуючого пристрою електророзрядної обробки привибійних зон нафтових та газових свердловин для відновлення їх продуктивності до умов горизонтальних свердловин із середнім радіусом викривлення (від 50 до 290 м).

Невід'ємним етапом адаптації занурювальної частини пристрою повинна бути модернізація блоку ємнісних накопичувачів так як вона має найбільшу, порівняно з довжиною інших модулів довжину, за рахунок його елементів – високовольтних імпульсних конденсаторів ИКП-30-1,2. Блок ємнісних накопичувачів потребує переробки в частині зміни габаритів високовольтного імпульсного конденсатора та їх кількості в блоці та, разом з тим, залишається незмінною вимога щодо забезпечення середнього прогнозованого ресурсу високовольтного імпульсного конденсатора на рівні $1 \cdot 10^5$ зарядів-розрядів.

Зменшення довжини блоку ємнісних накопичувачів можливо за рахунок використання замість двох високовольтних імпульсних конденсаторів ИКП-30-1,2 - одного конденсатора з більшою енергоємністю [5,6].

Всім конструкторським рішенням із модернізації конструкції блоку ємнісних накопичувачів повинна передувати перевірка принципової можливості безвідмовної роботи високовольтного імпульсного конденсатора в горизонтальному положенні та встановлення його безвідмовного ресурсу.

Так як конденсатори призначені для експлуатації в умовах підвищених температур, виникає питання компенсації температурної зміни обсягу просочуючого діелектрика. Раніше для цих цілей у конструкціях конденсаторів застосовувалися металеві сильфони, які через постійні механічні навантаження на стиск - розтяг часто виходили з ладу. При цьому залежно від робочої температури експлуатації конденсаторів сильфони займали до 20 % корисного об'єму конденсатора. З метою підвищення надійності конденсаторів і зменшення їх довжини з їх конструкції були виключені металеві сильфони. Натомість їх у конструкції конденсатора був передбачений певний, значно менший ніж для механічних компенсаторів об'єм, що заповнюється електрично міцним газом, який і є речовиною, що стискається[7]. При роботі високовольтного імпульсного конденсатора в вертикальних нафтових свердловин це не викликає побоювань, тому що газ накопчувався головним чином в верхній внутрішній частині конденсатора, за межами пакету конденсаторних секцій.

Але при експлуатації конденсатора в горизонтальному положенні, газовий міхур може розподілитися в проміжку між корпусом конденсатора і пакетом секцій та ослабити електричну міцність його ізоляційних конструкцій усередині.

Високовольтний імпульсний конденсатор ИКП-30-1,2 випробували в горизонтальному положенні при температурі навколишнього середовища від 18 до 23 °С, тобто в умовах, коли газовий міхур, який розподілений всередині корпусу конденсатора, має максимальний об'єм.

Випробування проводили в режимі коливального розряду, при напрузі 30 кВ, амплітуді розрядного струму 9,86 кА, декремент згасання розрядної напруги дорівнював десяти, період розрядного струму становив 20 мкс, частота зарядів-розрядів – 0,5 Гц.

Після того як наробок конденсатора став $2 \cdot 10^5$ зарядів-розрядів, тобто вдвічі більше за необхідні $1 \cdot 10^5$ зарядів-розрядів, випробування були зупинені. Конденсатор ИКП-30-1,2 зберігає свою працездатність та головні технічні параметри і характеристики на рівні, які відповідають його паспорту.

З урахуванням уніфікованості існуючих приєднувальних пристосувань (муфт) в занурювальній частині пристрою з електророзрядної обробки привибійної зони нафтових та газових свердловин, та уніфікованості відповідних різьбових з'єднань, розроблена універсальна гнучка з'єднувальна муфта, що поєднуватиме між собою зарядний блок, блок ємнісних накопичувачів енергії, розрядник, електродну систему та окремі конденсатори в блоці накопичувачів.

Муфту, яка з'єднує циліндричні корпуса блоків між собою, виконано у вигляді двох циліндричних напівмуфт, з'єднаних між собою з одного торця кульовим з'єднанням, а з іншого торця в напівмуфтах виконані циліндричні отвори, у кожному з яких розміщений трубчастий ізолятор та високовольтний прохідний ізолятор. На торці високовольтного ізолятора встановлений металевий контакт, на якому закріплений пружний струмознімач у вигляді металевої стрічки, яка намотана на пружну втулку. Металеві контакти з'єднані між собою гнучким ізолюваним провідником, що проходить усередині високовольтних прохідних ізоляторів, через наскрізні осьові отвори, виконані в напівмуфтах та у кульовому з'єднанні, а струмовиводи кожного з модулів заглибної частини пристрою встановлені з можливістю електричного контакту з відповідними пружними струмознімачами циліндричних напівмуфт.

В разі з'єднання окремих блоків за допомогою розробленої гнучкої муфти при зовнішньому діаметрі корпусів блоків 101,6 мм максимальний кут між поздовжньою віссю напівмуфти та будь-якого блоку складає 7°. А величина набору зенітного кута від 3,1° до 9,6° характерна для свердловин із середнім радіусом викривлення та відповідає умовам свердловин з радіусом викривлення 108 м.

Висновки. Випробування високовольтного імпульсного конденсатора для пристрою з електророзрядної обробки привибійної зони нафтових та газових свердловин показали на можливість його роботи в просторових умовах пологих та горизонтальних свердловин.

Звичайно, результатів одного описуваного експерименту замало для того, щоб зробити висновки щодо середнього ресурсу високовольтного імпульсного конденсатора. Подальші роботи вимагають встановлення середнього ресурсу пристрою з використанням репрезентативної вибірки.

Розроблені гнучкі муфти дозволяють зменшити мінімальний робочий радіус викривлення профілю свердловини до величини 108 м, що лежить в області середніх радіусів викривлення профілів свердловин, але це потребує перевірки в умовах реальних свердловин.

Список використаних джерел

1 Large diameter coiled-tubing drilling / K. Newman, P. Kelleher, D. Rain, C. Cai // Petroleum Technology. – 1997. – Vol. 49, is. № 2. – P. 135-136.

2 Жекул В.Г. Разработка и создание высоковольтных малогабаритных погружных устройств для интенсификации добычи полезных ископаемых из недр Земли/ В.Г. Жекул, В.М. Косенков, Ю.И. Курашко, И.С. Швец // Материалы XII Междунар. науч. школы-семинар «Физика импульсных разрядов в конденсированных средах», 24-26 авг. 2005 г. Николаев. 2005. С. 101-102.

3 Хвощан О.В. Создание высоковольтных погружных систем для повышения дебита скважин./ О.В. Хвощан – Mauritius: LAP LAMBERT Academic Publishing. - 2018.- 217 с.

4 Щерба А.А. Високовольтні електророзрядні компактні системи / А.А. Щерба, К.В. Дубовенко // Київ: НВП «Видавництво “Наукова думка” НАН України». - 2008.- 270 с.

5 Гунько В.І. Дослідження тривалої електричної міцності (ресурсу) діелектричної системи занурювальних високовольтних імпульсних конденсаторів / В.І. Гунько, О.Д. Танасова, Т.А. Фещук // Матеріали Всеукраїнської науково – технічної конференції «Сучасні проблеми автоматики та електротехніки» СПАЕ 2024, 24-25 квітня 2024 р., Миколаїв. – НУК - С. 58-61. Режим доступу [https:// www.researchgate.net/ publication/ 380270420](https://www.researchgate.net/publication/380270420) Conference SPAE 2024.

6 Гунько В.І. Створення енергоємних високовольтних імпульсних конденсаторів для занурювальних електророзрядних установок / В.І. Гунько, О.Д. Танасова, І.А. Перекупка // Матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції «Сучасні проблеми автоматики та електротехніки» СПАЕ 2024, 24-25 квітня 2024 р., Миколаїв. – НУК. - С. 61-63. Режим доступу [https:// www.researchgate.net/ publication/ 380270420](https://www.researchgate.net/publication/380270420) Conference SPAE 2024.

7 Пат. 21508А України, МПК H01G 4/20. Спосіб виготовлення конденсаторів [Текст]./ А.К. Ткаченко, В.І. Гунько, І.Ю. Гребенников; заявник і патентовласник ІІПТ НАН України. – № 95073121, заявл. 04.07.95, опубл. 16.12.97, Бюл. 7. – 11 с.

УДК: 537.528+621.3.011.74

Козирев С.С., к.т.н., доцент

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв

Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України, м. Миколаїв

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МАКСИМАЛЬНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕКЗОТЕРМІЧНОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕНЕРГІЇ ПРИ ВИСОКОВОЛЬТНОМУ ЕЛЕКТРОХІМІЧНОМУ ВИБУХУ

Високовольтний електричний розряд в хімічно активних конденсованих середовищах, що не відносяться до вибухових речовин у традиційному розумінні, які здатні до екзотермічних перетворень в режимі вибухового горіння лише під дією високих температур і тисків, що розвиваються в електророзрядній плазмі каналу розряду, є джерелом концентрованої, дозованої дії з високими питомими енергетичними показниками. Причому поєднання енергії електричного розряду в конденсованому середовищі та енергії вибухового горіння екзотермічної суміші в каналі розряду дозволяє за ідентичних, порівняно з високовольтним електричним розрядом у рідині, рівнях силового та енергетичного впливу на об'єкт обробки суттєво зменшити витрати електроенергії, вартість та габарити електророзрядного обладнання. Це забезпечує високу ефективність використання високовольтного електрохімічного вибуху в якості енергоджерела в різних технологічних процесах, що вимагають потужного імпульсного впливу на об'єкти обробки (руйнування природних і штучних негабаритів; розпушування міцних донних ґрунтів; інтенсифікація процесів у водних, нафтових і газових скважинах; ущільнення й потовщення буронабивних паль у будівництві та ін [1-7]). Підвищення ефективності використання високовольтного електрохімічного вибуху в конденсованих середовищах у різних розрядно-імпульсних технологіях (РІТ) вимагає дослідження його енергетичних характеристик з метою визначення оптимальних режимів екзотермічного перетворення енергії в каналі розряду з виділенням максимально можливої кількості хімічної енергії.

Метою роботи є визначення за результатами дослідження енергетичних характеристик високовольтного електрохімічного вибуху (ВЕХВ) умов, що забезпечують максимальну ефективність екзотермічного перетворення енергії та максимальне виділення хімічної енергії ΔW_x в режимі вибухового горіння екзотермічної суміші (ЕС) в каналі високовольтного розряду, які можуть бути використані при проєктуванні енергоджерел для розрядно-імпульсних технологій на основі ВЕХВ з метою підвищення їх енергоефективності.

Ефективність екзотермічного перетворення енергії при високовольтному імпульсному розряді в екзотермічному середовищі визначається повнотою згорання маси M екзотермічної суміші, тобто величиною додаткової хімічної (теплової) енергії ΔW_X , що виділяється в каналі високовольтного розряду в результаті її згорання. З метою визначення яким чином впливають енергетичні характеристики ВЕХВ на величину вивільненої додаткової хімічної енергії ΔW_X були проведені експериментальні дослідження її залежності $\Delta W_X = f(M)$ від маси екзотермічної суміші M , введеної в зону розряду, при різних значеннях електричної енергії W_E , введеної в канал розряду, та її залежності $\Delta W_X = f(w_E)$ від питомої електричної енергії $w_E = W_E/M$. Ці дослідження дадуть змогу визначити умови забезпечення максимальної ефективності екзотермічного перетворення енергії, тому представляють практичний та науковий інтерес, враховуючи перспективи прикладного використання ВЕХВ у різних РІТ.

Експериментальні дослідження проводилися шляхом варіювання енергії W_E генератора імпульсних струмів (ГІС) з ємнісним накопичувачем енергії, який використовується в якості енергоджерела, та маси ЕС M , що вводиться в зону розряду. Електрична енергія ГІС W_E визначалась за значеннями електричних характеристик $I(t)$ і $U(t)$. При проведенні експериментальних досліджень важливим методичним моментом було визначення енергії ΔW_X , що виділилася в каналі розряду за рахунок хімічних екзотермічних перетворень. Для визначення хімічної енергії ΔW_X застосовуємо методику, яка використовувалась раніше [8]. При високовольтному розряді в екзотермічному середовищі сумарна енергія складається з електричної енергії енергоджерела (ГІС) W_E і теплової хімічної енергії ΔW_X , що вивільняється при згоранні екзотермічної суміші в каналі високовольтного розряду. Сумарну енергію в каналі розряду можна визначити за значенням енергії W_n післярозрядної парогазової порожнини (ПГВ), яка формується у процесі розширення каналу розряду. Для розподілу загальної енергії на електричну W_E та хімічну ΔW_X складові використовуємо вираз:

$$\Delta W_X = W_n - \eta_n W_E, \quad (1)$$

де W_n – повна енергія ПГП, Дж; η_n – коефіцієнт перетворення введеної в канал розряду електричної енергії W_E в енергію ПГП.

Кількість виділеної енергії в ПГП W_n визначалась за періодом пульсацій ПГП T_n , тобто за інтервалом часу між піками тиску. Величина коефіцієнта перетворення електричної енергії в каналі розряду η_n визначалась з емпіричного виразу [9].

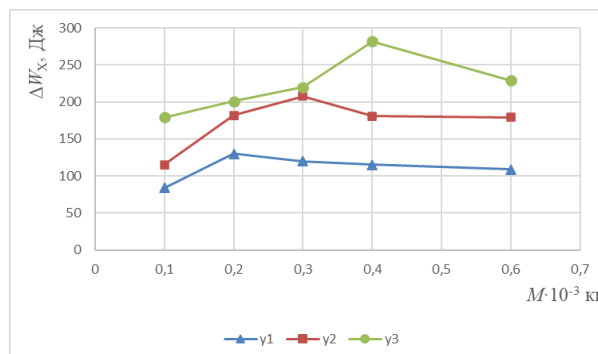
В експериментах маса ЕС M варіювалася в діапазоні $(0,1 - 0,6) \cdot 10^{-3}$ кг. Енергія ГІС W_E змінювалася в інтервалі від 300 Дж до 625 Дж шляхом варіювання ємності батареї конденсаторів C в діапазоні $(1,0 - 2,0) \cdot 10^{-6}$ Ф, величина зарядної напруги U_0 при цьому залишалася постійною, та дорівнювала $U_0 = 25 \cdot 10^3$ В, що обумовлено необхідністю підтримки постійної напруженості електричного поля для забезпечення пробією ЕС. Величина питомої електричної енергії змінювалась в широкому діапазоні $(0,52 - 6,25) \cdot 10^6$ Дж/кг.

Експериментальні дані та результати розрахунків величини додаткової хімічної енергії ΔW_X , що виділилася в каналі ВЕХВ за рахунок екзотермічних перетворень, наведено в таблиці.

Таблиця – Експериментальні та розрахункові дані

W_E , Дж	$M \cdot 10^{-3}$ кг	T_n , мс	W_n , Дж	$\eta_n \cdot W_E$, Дж	ΔW_X , Дж	$w_E \cdot 10^6$, Дж/кг
312,5	0,1	13,00	138,3	54,3	84,0	3,13
312,5	0,2	13,78	180,0	50,0	130,0	1,56
312,5	0,3	13,89	183,7	54,0	120,0	1,04
312,5	0,4	13,74	175,1	60,1	115,0	0,78
312,5	0,6	13,43	163,5	54,5	109,0	0,52
450	0,1	13,92	182,1	67,1	115,0	4,50
450	0,2	15,05	249,5	67,5	182,0	2,25
450	0,3	15,98	275,4	67,4	208,0	1,50
450	0,4	15,45	248,9	68,9	181,0	1,13
450	0,6	15,40	246,5	67,5	179,0	0,75
625	0,1	15,18	236,1	57,1	179,0	6,25
625	0,2	15,65	258,7	57,7	201,0	3,12
625	0,3	15,92	277,3	57,3	220,0	2,08
625	0,4	17,15	340,5	58,5	282,0	1,56
625	0,6	16,28	291,2	62,2	229,0	1,04

Результати експериментальних досліджень залежності величини хімічної енергії ΔW_X , що виділилася в каналі ВЕХВ за рахунок екзотермічних перетворень, від маси екзотермічної суміші M , що вводиться в розрядний проміжок, $\Delta W_X = f(M)$ для різних значень електричної енергії ГІС W_E представлені на рис. 1.



y1 – $W_E = 312,5$ Дж; y2 – $W_E = 450$ Дж; y3 – $W_E = 625$ Дж

Рисунок 1 – Залежність $\Delta W_x = f(M)$ величини хімічної енергії ΔW_x , що виділилася в каналі ВЕХВ, від маси екзотермічної суміші M для різних значень електричної енергії ГІС W_E

Аналіз отриманих експериментальних результатів показує, що для фіксованих значень електричної енергії ГІС W_E , що вводиться в канал розряду, спостерігається максимум хімічної енергії ΔW_x , яка виділяється в каналі розряду за рахунок екзотермічних реакцій. Причому зі зростанням енергії ГІС W_E максимум хімічної енергії ΔW_x зміщується у бік більших значень мас. Так, максимум залежності $\Delta W_x = f(M)$ спостерігається відповідно для $W_E = 312,5$ Дж при масі ЕС $M = 0,2 \cdot 10^{-3}$ кг, для $W_E = 450,0$ Дж при масі ЕС $M = 0,3 \cdot 10^{-3}$ кг, для $W_E = 625$ Дж при масі ЕС $M = 0,4 \cdot 10^{-3}$ кг. Наявність максимуму залежності $\Delta W_x = f(M)$ пояснюється тим, що при фіксованій величині енергії ГІС W_E та значному збільшенні маси ЕС M зменшується питома електрична енергія, що призводить до згасання екзотермічної реакції та зменшенню кількості виділеної хімічної енергії.

З наведених результатів випливає, що для кожного фіксованого значення енергії ГІС W_E існує оптимальна величина маси ЕС M , при якій хімічна енергія, що виділилася в каналі ВЕХВ за рахунок екзотермічних хімічних перетворень ΔW_x , максимальна. При цьому величина питомої електричної енергії $w_E = W_E/M$, введеної в канал розряду на одиницю маси ЕС, що забезпечує максимум виділення хімічної енергії, приблизно однакова для різних значень електричної енергії ГІС W_E , та лежить в межах $(1,50 - 1,56) \cdot 10^6$ Дж/кг.

Висновки. За результатами аналізу отриманих експериментальних даних при дослідженні енергетичних характеристик високовольтного електрохімічного вибуху можна дійти висновку, що у дослідженому діапазоні змін параметрів, спостерігаються наступні закономірності:

- при варіюванні маси ЕС M та фіксованій енергії ГІС W_E спостерігається максимум хімічної енергії ΔW_x , що виділилася в каналі ВЕХВ за рахунок екзотермічних перетворень, який зростає зі збільшенням введеної електричної енергії W_E , накопиченої в ГІС. Причому зі зростанням енергії ГІС максимум хімічної енергії ΔW_x зміщується у бік більших значень мас ЕС M ;
- для кожного фіксованого значення електричної енергії ГІС W_E , введеної в канал розряду, існує оптимальна величина маси ЕС M , при якій виділена хімічна енергія ΔW_x досягає максимальних значень;
- максимум хімічної енергії ΔW_x , що виділилася в каналі ВЕХВ за рахунок екзотермічних перетворень, забезпечується при оптимальному значенні питомої електричної енергії, введеної в канал розряду, $w_{E_{\text{опт}}} \approx 1,55 \cdot 10^6$ Дж/кг.

Використання визначених за результатами експериментальних досліджень ВЕХВ умов забезпечення виділення максимальної кількості додаткової хімічної енергії при синтезі комбінованих енергоджерел на основі ВЕХВ для розрядно-імпульсних технологій дасть змогу заощаджувати електроенергію, суттєво зменшивши енергозатрати за рахунок додавання максимально можливої величини хімічної енергії, що виділилась в результаті екзотермічних реакцій, мінімізувати витрати екзотермічних сумішей при реалізації технологічних операцій з використанням високовольтного електрохімічного вибуху та зменшити масогабарити й вартість генератора імпульсних струмів, що є джерелом електричної енергії.

Список використаних джерел

- 1 Гулий, Г.А. (1990). Научні основи розрядноімпульсних технологій. К: Наукова думка. – 208 с.
2. Різун, А.Р., Голень, Ю.В., Денисюк, Т.Д., Муштатний, Г.П. (2008). Імпульсні електророзрядні технології в будівництві. Будівництво України, 10, 39 – 43.
3. Хвоцан, О.В., Смірнов, О.П. (2022). Залежність енергетичних процесів високовольтних електророзрядних свердловинних комплексів "Скіф" від характеристик навантаження. Технічна електродинаміка, №1, 58-66. URL: <https://doi.org/10.15407/techned2022.01.0584>.
4. Денисюк, Т., Рачков, О., Старков, І. (2023). Підвищення енергоефективності переробки відходів збагачення руд електророзрядним методом. Вісник Національного технічного університету «ХПІ», 4(18), 98-105. URL: <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2023.04.14/>

5. Комплекс для електрогідроімпульсного руйнування міцних монолітних об'єктів під водою. Пат. 76299 Україна: МПК6 E21C37/18, E21C50/00. № 20040806566; заявл. 05.08.2004; опубл. 17.07.2006, Бюл. № 7/2006. 3 с. URL: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/389033/>
6. Rizun, A.R., Golen', Yu.V., Denisyuk, T.D. (2008). Seismically safe distances for bottom ground loosening by high-voltage electrochemical explosion. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, Vol. 44, No. 3, P. 240. URL: <https://link.springer.com/article/10.3103/S1068375508030125>.
7. Rizun, A.R., Golen', Yu.V., Denisyuk, T.D. (2007). Initiation of electrical discharge by exothermal compositions at destruction of firm soils. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, Vol. 43, No. 2, P. 116. URL: <https://link.springer.com/article/10.3103/S1068375507020093>.
8. Vovchenko, O. I., Demydenko, L. Yu., Kozyriev, S. S., Ovchinnikova, L. E. (2022). High Voltage Electrochemical Explosion in Discharge-Pulse Technologies. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, Vol. 58, No. 6, P. 731–738. URL: <https://link.springer.com/article/10.3103/S106837552206014X>.
9. Вовченко, О. І., Посохов, А. А. (1992). *Керовані електровибухові процеси перетворення енергії в конденсованих середовищах*. К.: Наук. Думка. – 168 с.

УДК 621.319.4

В.І. Гунько, О.Д. Танасова, Т.А. Фещук

Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України, м. Миколаїв

СТВОРЕННЯ СВЕРДЛОВИННИХ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ІМПУЛЬСНИХ КОНДЕНСАТОРІВ, ПРИЗНАЧЕНИХ ДЛЯ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ПРИ ВИСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

Актуальною проблемою для країн, що займаються нафто- та газовидобутком, у тому числі і для України, є завдання максимального вилучення корисних копалин із свердловин, а також ремонт нафтових та газових свердловин після тривалої експлуатації з метою відновлення їх дебіту.

Найбільш перспективним способом, як показала практика, підвищення дебіту свердловин є очищення привибійної зони свердловин від різного роду відкладень за рахунок навантаження їх імпульсним тиском електричного розряду в рідині, створюваним занурювальним електророзрядним пристроєм. У процесі обробки занурювальний пристрій рухається в свердловині вздовж її перфораційної зони, створюючи електричні розряди із заданою частотою. При цьому відбувається очищення перфораційної зони від шкідливих парафіністих, бітумних та різного роду твердих відкладень, внаслідок чого відновлюється її пористість у районі продуктивного пласта. Так, після обробки нафтових та газових свердловин занурювальними електророзрядними пристроями типу «Скіф», що створюються в ІІПТ НАН України (ІІПТ), видобуток нафти та газу зі свердловин відновлюється практично до проектної величини [1].

Останнім часом у галузі нафтовидобутку спостерігається стійка тенденція зниження запасів сировини, що викликає необхідність розробки глибоких свердловин. Тобто, актуальним є створення занурювальних електророзрядних пристроїв для обробки глибоких свердловин, у яких зовнішній гідростатичний тиск досягає 50 МПа, а температура навколишнього середовища становить близько 100 °С за перспективи розширення температурного діапазону до 125 °С [1,2].

Для зменшення габаритів та маси занурювальної частини свердловинний пристрій має блокову структуру, більша частина довжини та маси якого припадає на блок ємнісного накопичувача електричної енергії. В ІІПТ раніше проводилися дослідження зі створення занурювальних високовольтних імпульсних конденсаторів для малогабаритних електророзрядних пристроїв обробки привибійних зон нафтових і газових свердловин [2-6]. Конденсатори для цих пристроїв були створені на основі плівкового робочого діелектрика, просоченого малов'язкою діелектричною неполярною рідиною та призначені для експлуатації при температурі навколишнього середовища до 100 °С при ресурсі не менше $1 \cdot 10^5$ зарядів-розрядів [5-9]. В якості робочого діелектрика конденсаторів застосований комбінований плівковий поліпропіленово-поліетилентерефталатний діелектрик, просочений поліметилсилоксановою рідиною ПМС-20.

Якщо питання забезпечення механічної міцності корпусів конденсаторів при зовнішньому гідростатичному тиску 50 МПа вирішується повністю за рахунок конструкторських рішень, то питання впливу високої температури навколишнього середовища (до 125 °С) на працездатність плівкової діелектричної системи конденсатора може бути вирішене лише експериментально.

Робочий діелектрик, що застосовувався раніше в конструкціях конденсаторів, на основі комбінації поліпропіленової та поліетилентерефталатної плівок, не може бути використаний при температурах більше 100 °С. Причиною є те, що поліпропіленова плівка допускає тривалу експлуатацію при максимальній температурі 100 °С (короткочасно 120 °С), в той час коли тривала температура експлуатації поліетилентерефталатної плівки становить 155 °С [10].

На даному етапі робіт було запропоновано замінити в конструкції робочого діелектрика конденсатора поліпропіленову плівку на полікарбонатну плівку, яка допускає тривалу експлуатацію при 150 °С, не допускаючи при цій температурі розм'якшення та не знижуючи своєї міцності.

Метою роботи є - експериментальна оцінка довговічності (ресурсу) різних конструкцій робочого діелектрика для занурювальних високовольтних імпульсних конденсаторів при температурах навколишнього середовища до 125 °С.

З метою порівняння випробування проводилися при температурах навколишнього середовища 100 °С та 125 °С.

Були обрані такі діелектричні системи:

- поліетилентерефталатний діелектрик товщиною 35 мкм, просочений поліметилсилоксановою рідиною ПМС-20;
- комбінований полікарбонатно-поліетилентерефталатний діелектрик товщиною 35 мкм, просочений поліметилсилоксановою рідиною ПМС-20.

Для порівняння при температурах 100 °С и 125 °С випробовувався і комбінований паперово-поліетилентерефталатний діелектрик товщиною 50 мкм, просочений касторовою олією, що раніше широко застосовувався в конструкціях занурювальних високовольтних імпульсних конденсаторів.

Для проведення досліджень бралися такі діелектричні матеріали – поліетилентерефталатна плівка марки ПЕТ-КЕ, полікарбонатна плівка марки ПК-К та конденсаторний папір марки КОН 2.

Макети секцій виготовлялися циліндричної форми з фольгою, що виступає на торцях, подальшим її шоопіруванням і розміщувалися в індивідуальних металевих корпусах, в кількості семи штук для кожного типу діелектричної системи.

Враховуючи високу величину робочої напруженості електричного поля E_p в діелектрику, при випробуванні макетів секцій, непросочені макети секцій піддавалися відбраковуванням напругою постійного струму 4 кВ.

Термовакuumне сушіння та просочування макетів циліндричних секцій проводилося за режимами, розробленими в ІІПТ - протягом 7,2 діб для плівкового діелектрика, просоченого поліметилсилоксановою рідиною ПМС-20 і 19 діб для паперово-плівкового діелектрика, просоченого касторовою олією.

Експериментальні дослідження щодо визначення тривалої електричної міцності (ресурсу) різних діелектричних систем при температурах навколишнього середовища 100 °С и 125 °С проводилися в режимі коливального розряду з наступними параметрами:

- робоча напруга, кВ 6,25;
- частота проходження циклів заряд-розряд, Гц 0,3;
- амплітуда розрядного струму через секцію, кА 0,3;
- декремент коливаний розрядної напруги 25.

Дані ресурсних випробувань макетів циліндричних секцій з різними діелектричними системами при температурах навколишнього середовища 100 °С и 125 °С наведені в таблиці 1.

Таблиця 1 - Дані ресурсних випробувань макетів секцій

Тип діелектрика і його конструкція	Просочуючий діелектрик	E_p , кВ/мм	Середнє напрацювання макетів секцій, зарядів-розрядів, при температурі навколишнього середовища	
			100 °С	125 °С
поліетилентерефталатний ПЕТ-КЭ 2x10+1x15	ПМС-20	178,6	$3,87 \cdot 10^5$	$1,12 \cdot 10^5$
комбінований полікарбонатно-поліетилентерефталатний ПК-К 1x10+1x15+ПЕТ-КЕ 1x10			$4,12 \cdot 10^5$	$1,55 \cdot 10^5$
комбінований паперово-поліетилентерефталатний КОН2 3x10+ПЕТ-КЕ 2x10	Касторова олія	125,0	$4,06 \cdot 10^5$	$6,52 \cdot 10^4$

Аналізуючи дані таблиці видно, що при зростанні робочої температури навколишнього середовища від 100 °С до 125 °С відбувається суттєве зниження ресурсу всіх досліджуваних діелектричних систем. Так широко застосовуваний раніше в конструкціях занурювальних конденсаторів комбінований паперово-поліетилентерефталатний діелектрик взагалі не забезпечує необхідний ресурс, щонайменше $1 \cdot 10^5$ зарядів-розрядів, при температурі навколишнього середовища 125 °С.

Висновки. Результати проведених експериментальних досліджень показали, що для створення занурювальних високовольтних імпульсних конденсаторів, призначених для роботи одночасно як при температурі навколишнього середовища 100 °С, так і при температурі навколишнього середовища 125 °С найбільш доцільно використовувати комбінований полікарбонатно-поліетилентерефталатний діелектрик, просочений поліметилсилоксановою рідиною ПМС-20.

Необхідно відзначити, що проведення ресурсних випробувань виготовлених занурювальних високовольтних імпульсних конденсаторів на основі обраної діелектричної системи, з метою перевірки правильності прийнятих конструктивних рішень, економічно не доцільно, через високу вартість цих конденсаторів. Тому перевірка правильності прийнятих рішень здійснюватиметься методом збору статистичних даних із місць експлуатації конденсаторів.

Список використаних джерел

- 1 Хвощан О.В. Создание высоковольтных погружных систем для повышения дебита скважин./ О.В. Хвощан – Mauritius: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2018.- 217 с.
- 2 Жекул В.Г. Разработка и создание высоковольтных малогабаритных погружных устройств для интенсификации добычи полезных ископаемых из недр Земли / В.Г. Жекул . В.М. Косенков , Ю.И. Курашко, И.С. Швец // Материали XII Междунар. науч. школы-семинар «Физика импульсных разрядов в конденсированных средах», 24-26 авг. 2005 г. Николаев: КП «Ник. обл. типография», - 2005. С. 101-102.
- 3 Щерба А.А. Високовольтні електророзрядні компактні системи / А.А. Щерба, К.В. Дубовенко – Київ: НВП «Видавництво “Наукова думка” НАН України». - 2008.- 270с.
- 4 Дмитришин А.Я. Создание высоковольтных импульсных конденсаторов для малогабаритных скважинных устройств/ А.Я. Дмитришин, И.Ю. Гребенников, В.И. Гулько, Л.И. Онищенко, С.О. Топоров// Електротехніка і електромеханіка (ЕТЕМ-2006 Всеукр. н.-т. конф. студентів, аспірантів, молодих вчених з міжнар. участю (13-14 листопада 2006р.), -Миколаїв, НУК.-2006.-С.20-21.
- 5 Рудаков В.В. Стан та тенденції розвитку високовольтних імпульсних конденсаторів / В.В. Рудаков // ВІСНИК НТУ«ХПІ»: Серія: Техніка і електрофізика високих напруг. – Харків: НТУ «ХПІ» – 2009. - № 39. – С. 146-152
- 6 Гребенников И.Ю. Перспективы повышения запасаемой энергии высоковольтных импульсных конденсаторов скважинных электроразрядных устройств / И.Ю. Гребенников, В.И. Гулько, А.Я. Дмитришин, Л.И. Онищенко, И.С. Швец // Физика импульсных разрядов в конденсированных средах: Матер. XII Междунар. Науч. шк.-семинара (22-26 августа 2005 г.) Николаев: КП «Ник. обл. типография», -2005. - С159-161.
- 7 Гулько В.І. Дослідження електричної міцності діелектричної системи занурювальних високовольтних імпульсних конденсаторів / В.І. Гулько, О.Д. Танасова, Т.А.Фещук // Матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції студентів,аспірантів та молодих вчених. Автоматика та електротехніка АЕ-2023. 13-14 листопада 2023, Миколаїв.- НУК.- 2023.- С. 27-29. Режим доступу https://www.researchgate.net/publication/375715743_Conference_AE2023.
- 8 Гулько В.І. Дослідження тривалої електричної міцності (ресурсу) діелектричної системи занурювальних високовольтних імпульсних конденсаторів / В.І. Гулько, О.Д. Танасова, Т.А. Фещук // Матеріали Всеукраїнської науково – технічної конференції «Сучасні проблеми автоматики та електротехніки» СПАЕ 2024, 24-25 квітня 2024 р., Миколаїв. – НУК С. 58-61. Режим доступу https://www.researchgate.net/publication/380270420_Conference_SPAE_2024.
- 9 Гулько В.І. Створення енергоємних високовольтних імпульсних конденсаторів для занурювальних електророзрядних установок / В.І. Гулько, О.Д. Танасова, І.А. Перекупка // Матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції «Сучасні проблеми автоматики та електротехніки» СПАЕ 2024, 24-25 квітня 2024 р., Миколаїв. – НУК. - С. 61-63. Режим доступу https://www.researchgate.net/publication/380270420_Conference_SPAE_2024.
- 10 Дмитришин О.Я. Аналіз діелектричних матеріалів для діелектричної системи високовольтних імпульсних конденсаторів, що експлуатуються в режимах з високою частотою проходження імпульсів / О.Я. Дмитришин, В.І. Гулько, Т.А.Фещук // Матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції студентів,аспірантів та молодих вчених. Автоматика та електротехніка СПАЕ-2019. 4-5 квітня 2019р, Миколаїв.- НУК.- 2023.- С. 27-29.

СЕКЦІЯ 2. ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНІ КОМПЛЕКСИ, ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ І АПАРАТИ

УДК 621.311.24:621.314

Стрункін Г.М., інженер-конструктор, магістр

Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні ЗНУ, ТОВ «Плутон ІС», м. Запоріжжя

МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ АВТОНОМНОЇ ВЕУ З АДМ НА БАЗІ АГФР ЗІ ЗБУДЖЕННЯМ ВІД ІНВЕРТОРА НАПРУГИ ПРИ РЕКУПЕРУЮЧОМУ НАВАНТАЖЕННІ

Здійснення енергетичного переходу неможливо без розвитку вітроенергетики. Україна та її енергетика не є виключенням: згідно з затвердженням 25.06.2024р. Кабінетом міністрів України «Національним планом з енергетики та клімату на період до 2030р.» частка енергії відновлювальних джерел к 2030р. повинна становити 27% [1]. Додатково 13.08.2024р. Кабінет міністрів України ухвалив розпорядження про затвердження «Національного плану дій з відновлюваної енергетики на період до 2030 року» [2], у якому введення нових вітрогенеруючих потужностей, у тому числі й автономних, займає найвищий пріоритет.

Для підвищення надійності вітротурбіни та зменшення їх експлуатаційних витрат використовується безмультиплікаторні схеми. Одним із напрямків розвитку безмультиплікаторних схем є аеродинамічне мультиплікування АДМ [3]. Перспективним є використання для управління режимом вітроенергетичної установки (ВЕУ) систем з неповним перетворенням енергії на базі асинхронного генератора з фазним ротором (АГФР), структурну схему яких наведено у [4], а енергетичні режими досліджено в [5]. Моделювання деяких режимів автономної установки частково зроблено в [6].

Як зазначено в [5], при експлуатації автономної ВЕУ з АДМ можливий режим, при якому навантаження віддає енергію до генеруючої установки (рекуперація). На відміну від системних ВЕУ, в автономних неможливий перерозподіл енергії іншим споживачам. Результатом такого твердження виявляється вимога по наявності в складі ВЕУ гальмівного резистора для розсіювання зайвої енергії.

Зважаючи на те, що система є новою, а її моделювання проводилося лише для деяких режимів, вивчення роботи автономної ВЕУ з АДМ при рекуперуючому навантаженні є актуальним.

Метою роботи є моделювання роботи електромеханічної системи автономної ВЕУ з АДМ на базі АГФР зі збудженням від інвертора напруги при рекуперуючому навантаженні.

Опис електромеханічної системи автономної ВЕУ з АДМ на базі АГФР зі збудженням від інвертора напруги

Схему електромеханічної системи автономної ВЕУ з АДМ на базі АГФР зі збудженням від інвертора напруги представлено на рис. 1.

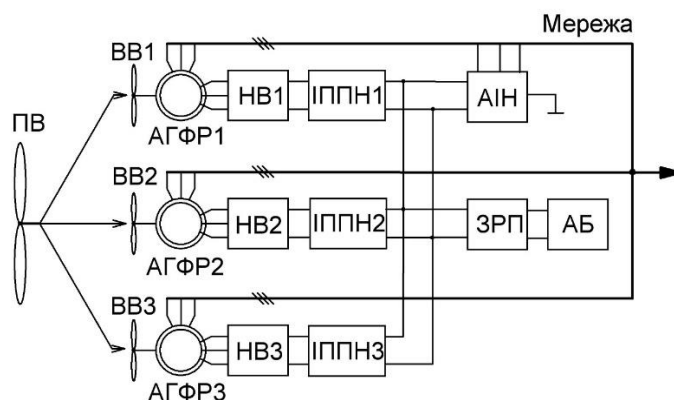


Рисунок 1 – Структурна схема електромеханічної системи автономної ВЕУ з АДМ на базі АГФР зі збудженням від інвертора напруги

При наявності вітру, первинна вітротурбіна ПВ з незмінним кутом встановлення лопатей створює вітровий потік великої швидкості для вторинних вітротурбін ВВ1...ВВ3, розташованих на лопатях ПВ, які, в свою чергу, обертають асинхронні генератори з фазним ротором АГФР1...АГФР3. Енергія знімається як з боку статора кожного генератора, так і з боку ротора (енергія ковзання) через індивідуальний некерований випрямляч НВ1...НВ3. Коли швидкість вітру перевищує номінальну, можливо зменшення моменту шляхом регулювання проти-ерс імпульсного перетворювача постійної напруги ІППН1...ІППН3, який є навантаженням некерованих випрямлячів. Енергія ковзання використовується також для підзарядки акумуляторної батареї АБ. Струм заряджання АБ формується зарядно-розрядним пристроєм ЗРП. Автономний інвертор напруги АІН формує мережу та компенсує реактивну потужність генераторів.

Моделювання роботи електромеханічної системи автономної ВЕУ з АДМ на базі АГФР зі збудженням від інвертора напруги при рекуперуючому навантаженні

Детальний опис моделі електромеханічної системи автономної ВЕУ з АДМ на базі АГФР зі збудженням від інвертора напруги в середовищі PSIM наведено в [6].

Рекуперуюче навантаження за наявності генерації призводить до надлишку енергії в ланцюзі постійного струму перетворювача. Наявність двох енергетичних трактів від ротора та статора АГФР (через зворотні діоди інвертора у протифазі) призводитиме до виникнення позитивного зворотного зв'язку і, вірогідно, до виникнення коливаний напруги. Для підтвердження припущення модель [6] доповнимо джерелом змінної напруги з фазою 180° , яке включено послідовно з навантаженням. Результати моделювання наведено на рис. 2.

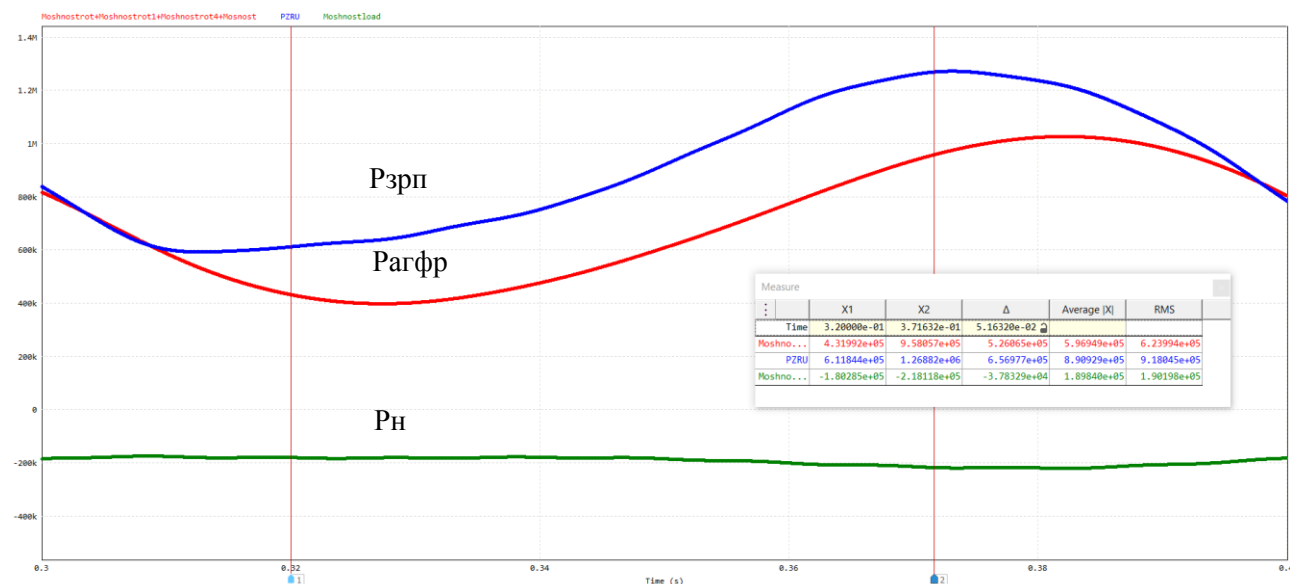


Рисунок 2 – Результати моделювання автономної ВЕУ при рекуперуючому навантаженні

Можна бачити негативну потужність навантаження P_n та надлишок енергії P_{zrp} , яка поступає в акумуляторну батарею, що відповідає потужності рекуперації. Тобто, ця енергія повинна бути розсіяна в гальмівному резисторі чопера. Також, як і прогнозувалось, можна відмітити наявність автоколиваний. Придушення їх за допомогою системи управління пов'язано з необхідністю використання регулятора з перемикуванням. Тобто при рекуперуючому навантаженні налаштування регуляторів роторного ІППН відрізняються від штатних. Синтез такого регулятора та питання його налаштування – тема подальших публікацій.

Висновки. Моделювання роботи електромеханічної системи автономної ВЕУ з АДМ на базі АГФР зі збудженням від інвертора напруги підтвердило припущення про можливість виникнення коливаний потужності ВЕУ та сформулювати задачу синтезу регулятора для ІППН, який керує потужністю установки.

Список використаних джерел

1. Національний план з енергетики та клімату на період до 2030 року. URL: <https://me.gov.ua/Documents/Detail?lang=uk-UA&id=17f558a7-b4b4-42ca-b662-2811f42d4a33&title=NatsionalniiPlanZEnergetikiTaKlimatuNaPeriodDo2030-Roku> (дата звернення 17.03.2025).
2. Про затвердження Національного плану дій з відновлюваної енергетики на період до 2030 року та плану заходів з його виконання. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/761-2024-%D1%80#n12>. (Дата звернення 18.03.2025).
3. Голубенко Н.С. Тенденции развития ветроэнергетики и безмультипликаторные ветровые установки / Голубенко Н.С., Довгалюк С.М., Фельдман А.М., Цыганов В.А. // Нетрадиционная энергетика XXI века: Материалы IV международной конференции (Крым, Гурзуф, 2003) – 2003 – С.68-74.
4. Стрункін, Г. (2024). Автономна вітроенергетична установка з аеродинамічним мультиплікуванням на базі асинхронного генератора з фазним ротором зі збудженням від інвертора напруги. Технічні науки та технології, (4 (38)), 245–253. doi: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-4\(38\)-245-253](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-4(38)-245-253).
5. Стрункін Г.М. Аналіз режимів роботи електромеханічної системи автономної ВЕУ з АДМ на базі АГФР зі збудженням від інвертора напруги. // Автоматика та електротехніка: Матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених [Електронний ресурс]. – Миколаїв: НУК, 2024. – С.11-14. URL: <https://eir.nuos.edu.ua/items/e5815849-20db-4be5-9c66-d17fb6c84d64> (Дата звернення 4.12.2024).
6. Strunkin H., "Simulation of the operation of an autonomous wind power plant with aerodynamic multiplication based on asynchronous generator with a phase rotor with excitation from a voltage-source inverter," Turk J Electr Power Energy Syst., Published online January 27, 2025. doi: <https://doi.org/10.5152/tepes.2025.24034>.

УДК 629.12:629.56

Волянський Ю. С., Яценко В. С., аспіранти PhD,
 Волянська Я. Б., д.т.н., Волянський С. М., к.т.н.,
 Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв

ОЦІНКА ВПЛИВУ КАВІТАЦІЇ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ПРОПУЛЬСИВНИХ КОМПЛЕКСІВ ОБ'ЄКТІВ МОРСЬКОЇ РОБОТОТЕХНІКИ

Як відомо, пропульсивна установка – це силовий комплекс судна, основна виконавча частина головної суднової енергетичної установки, мета якої – конвертація механічної енергії двигуна в рухову енергію, що призводить до руху судна на воді або під водою. Складається пропульсивний комплекс (ПК) з декількох частин: корпусу судна; головного двигуна; редуктору чи головної передачі; валового приводу та рушіїв. Усі елементи ПК взаємозв'язані. Тому від кожного з них залежать морехідні якості судна та й в результаті його техніко-економічні показники.

Робота головного двигуна відрізняється великим діапазоном експлуатаційних навантажень. Це пов'язано з систематичною зміною умов плавання судна через метеорологічну обстановку, характер завдання, що виконується, а також від технічного стану корпусу судна. Таким чином, робота головних двигунів відбувається в різних умовах і пов'язана із значною зміною їх показників: потужності, економічності, теплової та механічної напруженості та ін. Сукупність значень цих показників характеризує режим роботи двигуна. Судновий рушій (гребний гвинт) перетворює механічну енергію головних двигунів, що підводиться до нього, в упор і корисну тягу, які передаються через головний упорний підшипник на корпус, що забезпечує рух судна із заданою швидкістю.

Під впливом гідродинамічних, конструктивних та експлуатаційних факторів може виникнути таке явище, як кавітація, спроможне спричинити ряд негативних наслідків. Кавітація на гребному гвинті призводить до зниження ефективності та тяги, створюючи надмірний шум та вібрацію. Вона може призвести до ерозії та пошкодження лопатей гребного гвинта, порушити його структурну цілісність. Крім того, кавітація впливає на маневреність судна через незбалансований розподіл тяги, що потенційно знижує його пропульсивні якості, загальну продуктивність та експлуатаційну довговічність.

Метою роботи є розробка заходів для запобігання виникненню кавітації, які направлені на забезпечення максимальної ефективності роботи пропульсивних комплексів об'єктів морської робототехніки.

Кавітація виникає внаслідок зниження тиску, що відбувається у процесі обтікання рідиною твердих тіл, які рухаються з великими швидкостями. Зниження тиску призводить до появи розтягуючих напруг і порушенню міцності рідини. Зі збільшенням частоти обертання зростає упор суднового рушія внаслідок зростання тиску на стороні нагнітальної лопаті і зниження тиску до величини насиченої пари на стороні, що засмоктує. У цьому випадку вода закипає і на поверхні, що засмоктує, утворюються порожнечі (бульбашки), що заповнюються парами води і газами. Наявність цих порожнин (кавітаційних каверн) суттєво змінює умови обтікання лопатей гребного гвинта.

Причинами кавітації є схема та швидкість потоку води, хвилі тиску та ударні хвилі, що утворюються, форма та розмір лопатей гребного гвинта, крок і кут атаки, швидкість судна, глибина води та навантаження на гребний гвинт (табл. 1).

Таблиця 1 – Причини і наслідки кавітації

№ з/п	Причини кавітації	Наслідки кавітації
1	Високі швидкості	Зі збільшенням швидкості обертання гребного гвинта зростає і можливість виникнення кавітації. На високих швидкостях різниця тисків між стороною низького та високого тиску на лопаті гребного гвинта може бути значною, що призводить до утворення порожнин, заповнених паром.
2	Недостатнє занурення	Коли гребний гвинт не повністю занурений у воду, наприклад, при роботі на мілководді або при розгоні судна, тиск води над лопатями гвинта знижується. Таке падіння тиску може спричинити кавітацію.
3	Недосконала конструкція лопатей	Неправильна конструкція лопатей гребного гвинта, включаючи надмірний вигин або товщину, може сприяти виникненню кавітації. Недосконало спроектовані лопаті не можуть плавно справлятися з потоком води, що призводить до утворення локальних областей низького тиску, що сприяють кавітації.
4	Умови бурхливої води	Бурхливе море або турбулентна вода можуть створювати нерівномірні потоки навколо гребного гвинта, збільшуючи ймовірність виникнення кавітації. Раптові зміни тиску води та збурення потоку можуть сприяти утворенню порожнин, заповнених паром.
5	Пошкодження або забруднення	Пошкодження лопатей гребного гвинта, такі як вм'ятини, зазубрини або нерівності поверхні, можуть порушити плавний перебіг води, що призведе до кавітації. Також наявність морських обростань або нальоту на гребному гвинті може порушити потік води і викликати кавітацію.

Негативний вплив кавітації на характеристики гребного гвинта може бути значним. Кавітація зазвичай починається на кінчиках лопатей і поступово поширюється по всій лопаті зі збільшенням навантаження на гребний гвинт. Якщо кавітація поширилася приблизно до 0,75 радіуса, виявляється значна втрата тяги, за якою слідує зниження крутного моменту, що на практиці означає значне збільшення числа оборотів при заданій потужності. Оскільки розрив тяги відбувається швидше, ніж зміна крутного моменту, це може призвести до значного зниження ефективності. Наслідки дії кавітації на гребний гвинт показано на рис. 1. Отже, важливо не тільки розуміти причини кавітації, а й вживати заходів для запобігання її виникненню, щоб забезпечити максимальну ефективність роботи гребного гвинта.

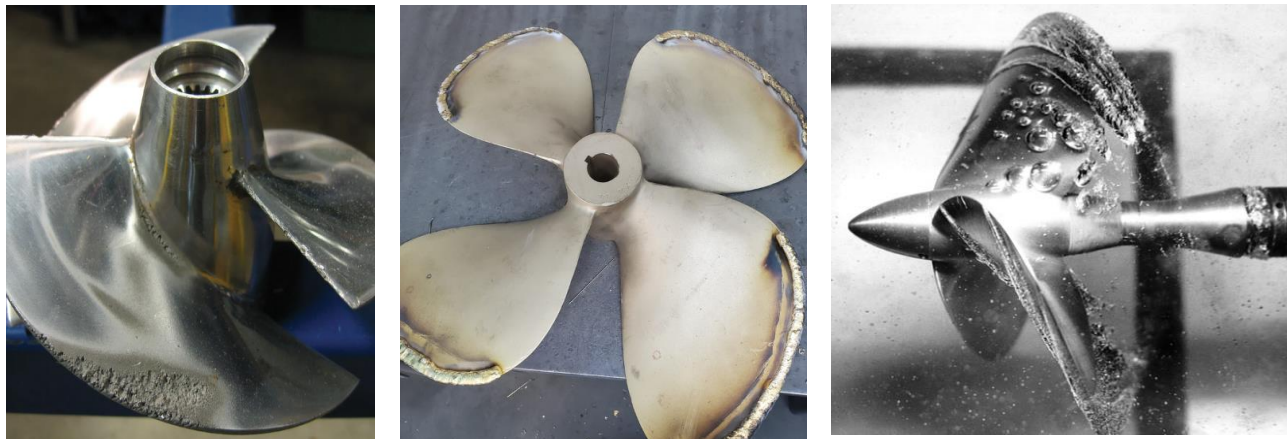


Рисунок 1 – Приклади негативного впливу кавітації на конструкцію гребного гвинта

Ефективні стратегії зниження дії кавітації в судових пропульсивних комплексах зосереджені на модифікаціях конструкції, корекціях експлуатації та передових технологіях. Оптимізація конструкції гребного гвинта, включаючи форму та розмір лопатей, значно зменшує сприйнятливість до кавітації шляхом покращення гідродинамічних характеристик. Операційні стратегії, такі як підтримання оптимальної швидкості судна та уникнення різких змін курсу, ще більше пом'якшують наслідки кавітації. Ці заходи допомагають підтримувати постійний тиск і зменшувати локальні порушення потоку, зменшуючи ймовірність кавітації.

Технологічні досягнення, включаючи використання покриттів і матеріалів, розроблених для протистояння кавітації, відіграють вирішальну роль. Ці інноваційні рішення можуть збільшити довговічність гребного гвинта та зменшити витрати на обслуговування, пов'язані зі зносом, спричиненим кавітацією. Нарешті, впровадження систем моніторингу в режимі реального часу може надати важливі дані про поведінку кавітації, дозволяючи своєчасно коригувати параметри руху. Включаючи ці стратегії, сучасні судна можуть підвищити ефективність роботи, мінімізуючи негативні наслідки кавітації гребного гвинта.

Висновки. Проведено аналіз причин і наслідків дії кавітації на судові пропульсивні комплекси. Встановлено, що для зниження негативних наслідків кавітації можна використовувати різні конструктивні зміни та методи, такі як правильна геометрія лопатей, вибір матеріалу та ефективна гідродинамічна оптимізація, використання двигунів з постійними магнітами, які можуть обертати вал гребного гвинта з периферії, а не з центру. Крім того, регулярне технічне обслуговування, включаючи огляд та ремонт гребних гвинтів, має вирішальне значення для мінімізації згубного впливу кавітації та забезпечення оптимальної роботи пропульсивних комплексів об'єктів морської робототехніки.

Список використаних джерел

1. Carlton, J. S. *Marine Propellers and Propulsion* (4th Edition) / J. S. Carlton. – Oxford: Butterworth-Heinemann / Elsevier, 2019. – 585 p. ISBN: 978-0-08-100394-5.
2. Ghaemi, M. H. Analysis of hull, propeller and engine interactions in regular waves by a combination of experiment and simulation / M. H. Ghaemi, H. Zeraatgar // *Journal of Marine Science and Technology*. – 2020. – Vol. 26 (4). – P. 257–272. DOI: 10.1007/s00773-020-00734-5.
3. Karaalioglu, M. Investigation of Cavitating Marine Propeller Performance Using Blade Element Momentum Theory / M. Karaalioglu, Bal S. // *3rd International Meeting-Progress in Propeller Cavitation and its Consequences: Experimental and Computational Methods for Predictions*, Istanbul, 15–16 November 2018. – Istanbul, Turkey. – 2018.
4. Shi, J. Comparative study on related models of propeller cavitation numerical simulation / Shi J., Zhang D., Xu S., Chen Yu., Qin S., Liu X., Hou G. // *Chinese Journal of Ship Research*. – 2023. – Vol. 18 (6). – P. 1–11. DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.03089.
5. Tokgoz, E. Computation and experiment of propeller thrust fluctuation in waves for propeller open water condition / Tokgoz E., Wu P.-C., Takasu S., Toda Y. // *Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers*. – 2017. – Vol. 25. – P. 55–62. DOI: 10.2534/jjasnaoe.25.55.

УДК 621.436

*Чекунов В.К., Костюченко В.І., к.т.н., доцент**Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв, Україна***СУЧАСНІ АСПЕКТИ РОЗВИТКУ ЕЛЕКТРОРУШІЙНИХ СИСТЕМ СУДНА**

Розвиток систем електричного руху суден – один із ключових трендів у морській і річковій галузі, спрямований на підвищення екологічності, ефективності й надійності морського транспорту [1]. Основні напрямки розвитку електричного руху суден:

1. Перехід до повністю електричних суден.
2. Використання гібридних енергетичних установок.
3. Використання водневих й паливних елементів.
4. Автоматизація й керування енергією.
5. Розвиток портової інфраструктури для зарядки суден.
6. Використання поновлюваних джерел енергії.

Перехід до повністю електричних суден базується на використанні літій-іонних акумуляторів і розробці інших типів накопичувачів енергії. Це особливо актуально для прибережних маршрутів, поромів, туристичних човнів.

Прикладом може бути пасажирський пором Ampere (Норвегія), вантажне судно Yara Birkeland (Норвегія) та інші [2].

Ampere – перший у світі повністю електричний автомобільний пором, побудований норвезькою суднобудівною компанією Fjellstrand у співробітництві з Siemens й оператором Norled. Судно було уведено в експлуатацію в травні 2015 року й обслуговує маршрут через Согне-фьорд між Лавик й Оппедал. Пором довжиною 80 метрів і шириною 21 метр уміщає до 120 автомобілів й 360 пасажирів. Його літій-іонні батареї ємністю 1 МВт·г дозволяють робити близько 34 рейсів у день, кожен тривалістю 20 хвилин, з 10-хвилинною підзарядкою між рейсами. Використання Ampere дозволяє щорічно заощаджувати біля мільйона літрів дизельного палива й скорочувати викиди CO₂ на 2 640 тонн.



Рисунок 1 – Перший у світі повністю електричний автомобільний пором Ampere

Yara Birkeland – перше у світі автономне й повністю електричне контейнерне судно, розроблене норвезькою компанією Yara International у співробітництві з технологічною фірмою Kongsberg. Судно довжиною 80 метрів і шириною 15 метрів призначено для перевезення добрив між заводом Yara у Порсгунне й портами Бревик і Ларвик (до 120 контейнерів TEU), замінюючи близько 40 000 перевезень вантажівками у рік. Yara Birkeland оснащений батареями ємністю 6,8 МВт·г, що забезпечують швидкість до 15 вузлів (близько 28 км/г). Дозволяє скоротити викиди CO₂ на 1 000 тонн у рік [3].



Рисунок 2 – Електричне контейнерне судно Yara Birkeland

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. Використаються на круїзних лайнерах, рибальських суднах, криголамах.

Переваги гібридних енергетичних установок на судах [4]:

1. Зменшення викидів CO_2 і шкідливих речовин.

Значне скорочення викидів NO_x , SO_x , твердих частинок.

Відповідність міжнародним екологічним нормам (IMO, MARPOL тощо).

2. Економія пального.

Електродвигуни працюють ефективніше при змінних навантаженнях.

Можливість відключення основних двигунів у порту або при малих швидкостях.

Менше шуму та вібрацій.

3. Гнучкість експлуатації.

Перемикання між дизельним і електричним режимами залежно від ситуації (наприклад, під час маневрування в порту).

4. Покращене енергозбереження.

Можливість накопичення енергії (наприклад, через рекуперацію під час спуску якоря чи зниження швидкості).

Пасажи́рсько-автомо́бильний пором, що працює в гібридному режимі – Color Hybrid (Норвегія). Це найбільший у світі пасажирсько-автомобільний пором із технологією підключення, що працює на гібридній силовій установці. Судно обслуговує маршрут між Сандефіордом (Норвегія) та Стрьомстадом (Швеція), здійснюючи рейси тривалістю 2,5 години [5].

Технічні характеристики: довжина 160 метрів, ширина 27,1 метра, осадка 6 метрів. Вміщує до 2 000 пасажирів та 500 автомобілів. Екіпаж: 100 осіб. Батарейний блок: приблизно 5 МВт·год, що забезпечує до 60 хвилин плавання на швидкості до 12 вузлів. Швидкість: максимальна 17 вузлів.

Компанія Maersk Tankers вперше у світі встановила на нафтоналивних судна систему роторних вітрил. Два 30-метрових вітрила розміщені на палубі танкера Maersk Pelican. Проект реалізувала компанія Norsepower Oy Ltd. разом з Інститутом енергетичних технологій (ETI), а також Shell Shipping & Maritime. Його метою було знизити викиди силових установок танкера на 7-10%. Технічні характеристики судна: валова місткість 61724 т; дедвейт 109647 т; довжина габаритна 245,00 м; ширина габаритна 42,00 м.

Вітрила Norsepower Rotor Sails є самими більшими у світі. Це судовий рушій, що використовує енергію вітру на основі ефекту Магнуса. Роторні вітрила здатні створювати додаткову тягу судна, знижуючи навантаження на двигуни й дозволяючи заощаджувати паливо [6].

Основу рушія становить аеродинамічний профіль, вертикальна металева труба перетину, близького до яйцеподібного, з рухливим щитком, що поліпшує аеродинамічний поділ зовнішньої й внутрішньої поверхонь.

Насосна система нагнітає в трубу повітря, створюючи з однієї сторони вітрила необхідне розрідження; рух відбувається в напрямку, перпендикулярному тиску. Таким чином, вітрило працює як крило: з однієї сторони його повітря протікає повільніше, ніж з іншої, створюючи рушійну силу.



Рисунок 3 – Пасажирсько-автомобільний пором, що працює в гібридному режимі – Color Hybrid (Норвегія)

Кожне вітрило Norsepower Rotor Sail виготовлене з легких композитних матеріалів, і цим відрізняється від більш ранніх моделей. Власно роторне вітрило було створено дуже давно. Ще в 1924 році німецький інженер Антон Флеттнер побудував перший корабель із такими вітрилами. Проте довгий час ця ідея не знаходила широкого поширення. Лише кілька суден в світі використали систему. Але зараз, коли увесь світ прикладає зусилля до зниження парникових викидів, роторне вітрило знову стало актуальне [7].



Рисунок 4 – Танкер Maersk Pelican

Порівняльна таблиця 1 дозволяє оцінити переваги і недоліки різних типів енергетичних установок суден.

Таблиця 1. Порівняльна таблиця дизельних, гібридних та електричних суден

Критерій	Дизельне судно	Гібридне судно	Електричне судно
Джерело енергії	Дизельне паливо	Дизель + акумулятори (іноді – альтернативні джерела)	Акумулятори (повністю електричне живлення)
Викиди CO ₂	Високі	Знижені на 20–50%	Нульові під час роботи
Енергоефективність	Низька	Середня / висока	Висока
Шум / Вібрації	Високі	Зменшені	Мінімальні
Витрати на паливо	Високі	Помірні	Дуже низькі
Експлуатаційні витрати	Високі	Середні	Низькі (менше техобслуговування)
Дальність ходу	Висока	Висока / середня	Обмежена
Час заправки / зарядки	Швидкий	Помірний	Довгий (залежить від батарей)

Перспективний напрямок розвитку – використання водневих й паливних елементів. Використання водневих паливних осередків дозволяє отримати практично нульові викиди – продукт згоряння – вода. Але напрямок гальмується проблемами зберігання й безпеки водню, а також високою вартістю.

Приклад судна – проект Hydroville (Бельгія) – пасажирське судно на водневих паливних елементах. Hydroville — перше в світі акредитоване пасажирське судно, яке частково працює на водні в дизельному двигуні (H2ICE, 441 кВт). При 19 вузлах у двопаливному режимі (55% H₂) двигун заощаджує: 58% CO₂ порівняно з дизельним режимом; 65% NO_x порівняно з дизельним режимом; збільшення теплової ефективності на 13%.

Технічні характеристики: довжина 14 метрів; ширина: 4,2 метра; осад 0,65 метра; водотоннажність при повнім навантаженні 14 тонн; пасажировмісність 16 пасажирів й 2 члени екіпажу; швидкість: крейсерська: 22 вузла, максимальна: 27 вузлів. Силова установка: два двопаливних двигунів внутрішнього згоряння (H2ICED) загальною потужністю 441 кВт, що працюють на водні й дизельному паливі [8].

Паливна система. Hydroville оснащений 12 водневими баками обсягом по 205 літрів при тиску 200 бар, а також двома дизельними баками по 265 літрів кожний. Судно може працювати як на стислому водні, так і на звичайному дизельному паливі, що забезпечує гнучкість в експлуатації й знижує викиди шкідливих речовин.

Призначення й експлуатація. У первісний період експлуатації Hydroville використовувався для перевезення співробітників CMB між Круйбеке й Антверпеном, допомагаючи уникнути дорожніх заторів у години пік. Крім того, судно служить демонстраційною платформою для тестування й просування водневих технологій у морському транспорті. Hydroville також використовується для проведення спеціальних заходів й екскурсій, включаючи поїздки до офшорних вітряних електростанцій на бельгійському узбережжі.

За перший рік роботи було зекономлено понад 4000 кг CO₂ на основі спожитого H₂.



Рисунок 5 – Пасажирське судно на водневих паливних елементах Hydroville (Бельгія)

Автоматизація й керування енергією на судні дозволяють суттєво покращити ефективність експлуатації суден. Інтелектуальні системи керування розподіляють енергію між двигунами, батареями й допоміжними системами, що обумовлює підвищення ефективності за рахунок оптимізації маршрутів, енергозбереження, техобслуговування [9].

Сучасні транспортні й промислові системи стають усе більше складні й енергоємними, тому критично важливо ефективно управляти розподілом і споживанням енергії. Інтелектуальні системи автоматизації відіграють ключову роль у цьому процесі, забезпечуючи баланс між продуктивністю, надійністю й енергозбереженням. Складові цього процесу:

1. Інтелектуальний розподіл енергії

Централізоване й децентралізоване керування: Автоматизовані контролери координують роботу двигунів, акумуляторів і допоміжних систем (таких як клімат-контроль, висвітлення, системи безпеки).

Пріоритети навантаження: Залежно від ситуації система може перерозподіляти енергію - наприклад, при пікових навантаженнях обмежувати живлення менш критичних систем.

Гібридні й електричні платформи: У транспорті такі системи особливо важливі для гібридних й електричних машин, де потрібно враховувати рівень заряду батареї, ефективність рекуперації енергії й оптимальне використання електродвигунів.

2. Підвищення ефективності за рахунок цифрових технологій

Оптимізація маршрутів й операцій: використання GPS і картографічних даних для вибору найбільш економічного маршруту. Інтеграція з логістичними системами для координації графіків поставок і руху. Енергозберігаючі алгоритми: прогнозування пікового споживання й регулювання потужності в реальному часі; інтелектуальне відключення або перехід у сплячий режим невикористовуваних пристроїв. Предиктивне технічне обслуговування: використання датчиків й штучного інтелекту для прогнозування відмов устаткування до їхнього виникнення; зменшення простоїв за рахунок своєчасного техобслуговування; зниження витрат на ремонт і продовження терміну служби встаткування. Аналіз вібрацій і температури на головних двигунах дозволяють спрогнозувати знос або потенційний вихід з ладу – обслуговування проводиться лише за необхідності.

Автоматизація енергетичних процесів на судах забезпечує: зниження витрат на паливо до 10–20%; менший знос обладнання; вищу надійність та безпечність експлуатації.

Приклад автоматизації енергетичних процесів на судах можна розглянути на контейнеровозах компанії Maersk з системою Energy Efficiency Management, яка управляє навантаженням генераторів, виконує моніторинг витрати пального та викидів, оптимізує маршрут за погодними умовами.

Повністю інтегрована електрична пропульсійна система (Інтегрована енергетична пропульсійна система IPS), яка покликана сприяти використанню електроенергії показана на рис. 6 [10].

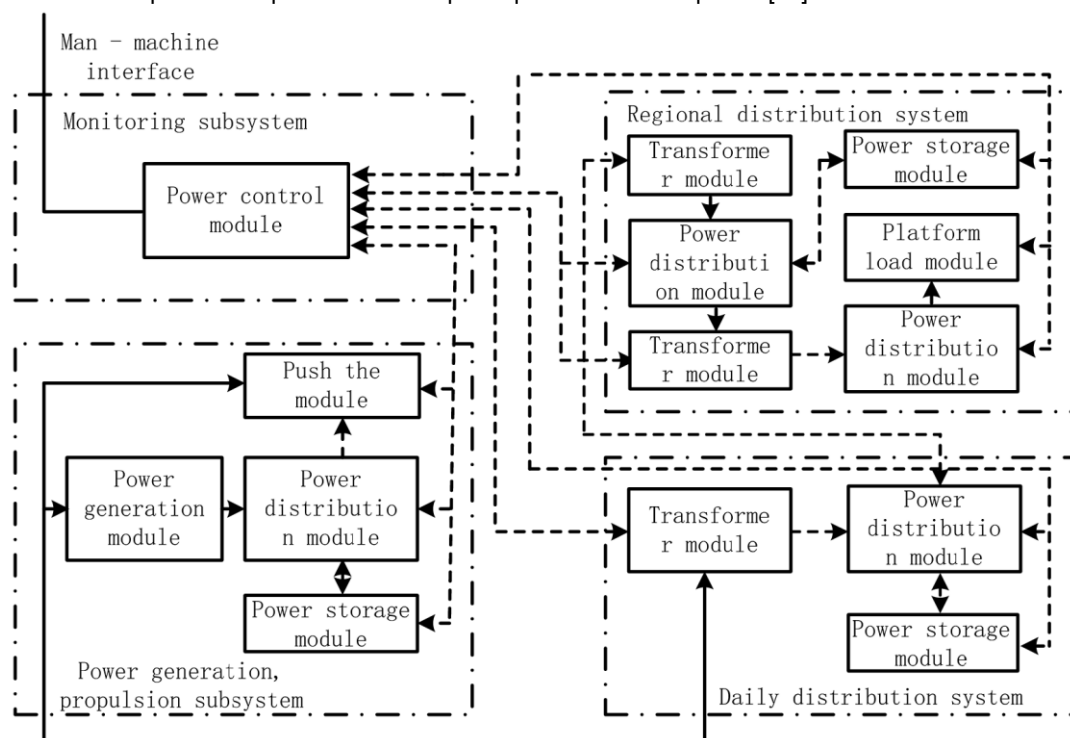


Рисунок 6 – IPS System

Для забезпечення переваг електричного руху суден потрібна інфраструктура зарядки накопичувачів енергії та стандартизація. Це завдання досягається за рахунок розвитку портової інфраструктури, створення станцій берегового електропостачання для зарядки гібридних та електричних суден під час стоянки. У великих портах потрібно встановлення високовольтних кабелів, трансформаторів і конверторів.

Приклади країн-лідерів будови сучасних портів: Норвегія, Нідерланди, Китай, де порти активно електрифікуються.

Крім портової інфраструктури розробляються уніфіковані стандарти підключення Shore Power (або Cold Ironing) – технологія, що дозволяє суднам вимикати двигуни в порту та підключатися до електромережі. Стандартизація: ISO/IEC/IEEE 80005 – міжнародний стандарт для високовольтного підключення суден, що передбачає єдиний тип роз'єму, напруги, частоти та протоколу безпеки [11].

Приклади інфраструктури зарядки та стандартизації

1. Порти, що впровадили shore power (cold ironing)

Порт	Країна	Що реалізовано
Порт Осло	Норвегія	Повністю електрифіковані причали для поромів і круїзних суден
Порт Роттердам	Нідерланди	Встановлено shore power для контейнеровозів, стандарти IEEE 80005
Порт Лонг-Біч	США	Shore power на всіх терміналах для контейнеровозів і круїзних лайнерів
Гонконг	Китай	Shore power на пасажирському терміналі для зменшення забруднення
Порт Гетеборг	Швеція	Встановлено зарядну інфраструктуру для електричних поромів

2. Судна, що використовують shore power / зарядку:

MF Ampere (Норвегія) – повністю електричний пором, заряджається в порту за 10 хвилин;

Color Hybrid (Color Line) – гібридний круїзний пором, що підключається до берегової мережі в портах;

Yara Birkeland – автономне контейнерне судно з електричним приводом, заряджається в порту Бревік (Норвегія);

Stena Jutlandica – гібридний пором (Швеція), використовує shore power у порту Гетеборга.

3. 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 cold ironing.

Використовуються в судах з енергоспоживанням від 0,5 до 10+ МВт під час стоянки.

Інфраструктура зарядки накопичувачів енергії важлива тому, наприклад, що круїзне судно, яке стоїть у порту з включеним дизель-генератором, може виділяти до 30 тонн CO₂ на добу. Shore power знижує ці викиди майже до нуля. Електричні поромы в Норвегії щорічно економлять до 1 млн літрів дизельного пального.

Важливим напрямком для збереження екології є використання відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) на судах. Найпоширеніше комбінування сонячної та вітрової енергії. Сонячні панелі встановлюються на палубах, дахах надбудов і навіть на вітрилах. Вітрогенератори використовуються на щоглах або платформах – зазвичай горизонтального або вертикального типу. Обидва джерела живлять: акумулятори; електродвигуни; системи навігації, освітлення, комунікації

Такі рішення знижують залежність від дизельного пального, особливо в автономному режимі або під час перебування на якорі.

Найчастіше використовуються на: автономних безпілотних судах; малих риболовецьких катерах; приватних яхтах і туристичних катамаранах; екологічних дослідницьких судах [12].

Конкретні приклади суден

Судно	Країна	Джерела енергії	Особливості
Energy Observer	Франція	Сонце, вітер, водень	Перше в світі судно на водневому паливі з ВДЕ
PlanetSolar	Швейцарія	100% сонячна енергія	Перше судно, що здійснило кругосвітню подорож на сонячній енергії
IWS Skywalker	Норвегія	Сонце акумулятори	+ Робочий катамаран з гібридним живленням для офшорних вітропарків
Silent Yachts	Німеччина	Сонячна енергія	Лінійка електричних катамаранів класу "люкс"

Переваги використання ВДЕ на судах: незалежність від пального – особливо важливо у віддалених районах; нульові викиди CO₂ під час роботи від ВДЕ; тиха робота двигунів – важливо для досліджень природи, дайвінгу, туризму; зниження витрат на обслуговування двигунів внутрішнього згорання.

Для використання ВДЕ потрібні системи керування енергією, які автоматично перемикаються між сонцем, вітром, акумуляторами та дизельними генераторами. Для цього використовують MPPT-контролери, інвертори, BMS (Battery Management System), які критично важливі для стабільної роботи.

Список використаних джерел

1. Кириченко О. В. Суднові електроенергетичні системи. – К.: Либідь, 2019.
2. Baldi, F., Ahlgren, F. Ship Propulsion Systems: Design, Modeling and Control. – Springer, 2020.
3. Papanikolaou A. Ship Design: Methodologies of Preliminary Design. Springer, 2014.
4. Tzanetos T., Theotokatos G. Hybrid and Electric Propulsion Technologies for Ships. – Elsevier, 2023.
5. Theotokatos, G., & Livanos, G. (2013). Techno-economic analysis of an electric propulsion system for a merchant ship. *Energy*, 59, 210-220.
6. Andersson, K., & Winnes, H. (2011). *Electric propulsion systems in ships: Trends and future prospects. *Journal of Marine Engineering & Technology*, 10(3), 43–52.
7. Zhou, P., Wang, H., & Guo, C. (2019). A review of hybrid propulsion systems for ships. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 109, 1-15.
8. Livanos, G. A., Theotokatos, G., & Pagonis, D. N. (2014). *Techno-economic investigation of alternative propulsion plants for Ferries and RoRo ships. *Energy Conversion and Management*, 79, 640–651.
9. Zhu, L. et al. (2022). Development trends in electric and hybrid-electric ship propulsion systems. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*.
10. DNV – Alternative fuels and technologies for greener shipping (<https://www.dnv.com/maritime>).
11. International Maritime Organization (IMO) – Greenhouse gas strategy and energy efficiency (<https://www.imo.org>).
12. ABB Marine & Ports – Electric propulsion technologies (<https://new.abb.com/marine>).

УДК 629.12:629.56

Онищенко О. В., Смалієвський В. Ю., здобувачі,
Красюк О. М., зав. лаб. каф. ЕІС та РК, Волянський С. М., к.т.н.
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв

ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ БАГАТОРІВНЕВИХ ІНВЕРТОРІВ У СИСТЕМАХ АВТОМАТИЗОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА

У роботі розглядаються сучасні топології багаторівневих інверторів та особливості їх застосування в системах автоматизованого електропривода. Виконано порівняльний аналіз основних типів багаторівневих інверторів: з фіксованою нейтральною точкою (NPC), з плаваючими конденсаторами (FC) та каскадних H-мостових інверторів (CHB). Встановлено їх переваги та недоліки з точки зору енергоефективності, складності керування та якості вихідної напруги.

Сучасні тенденції розвитку електроприводу характеризуються постійним підвищенням вимог до енергоефективності, якості електроенергії та надійності систем. У цьому контексті особливої актуальності набуває застосування багаторівневих інверторів, які дозволяють формувати вихідну напругу з низьким вмістом вищих гармонік, знижувати електромагнітні завади та забезпечувати більш високий ККД перетворення енергії [1]. Багаторівневі інвертори стають все більш привабливими для застосування в системах середньої та високої потужності, таких як промислові електроприводи, відновлювані джерела енергії, системи компенсації реактивної потужності та активні фільтри.

Мета роботи: аналіз сучасних топологій багаторівневих інверторів, визначення їх переваг та недоліків для застосування в системах автоматизованого електропривода, а також окреслення перспективних напрямків удосконалення цих систем.

1 Основні топології багаторівневих інверторів

1.1 Інвертор з фіксованою нейтральною точкою (NPC)

Інвертор з фіксованою нейтральною точкою, також відомий як діодно-фіксований інвертор, став першою практично реалізованою топологією багаторівневих перетворювачів [4]. У трирівневій конфігурації NPC-інвертора (рис. 1) кожна фаза містить чотири ключові елементи та два фіксуючі діоди, які підключають точку з'єднання ключів до нейтральної точки, утвореної серією конденсаторів у ланці постійного струму. Принцип роботи NPC-інвертора базується на комутації ключів у відповідній послідовності для формування трьох рівнів вихідної напруги: $+V_{dc}/2$, 0, $-V_{dc}/2$. Ключі в кожній фазі комутуються попарно: якщо S1 та S2 увімкнені, то вихідна напруга становить $+V_{dc}/2$; якщо S2 та S3 увімкнені, то формується нульовий рівень; якщо S3 та S4 увімкнені – вихідна напруга дорівнює $-V_{dc}/2$.

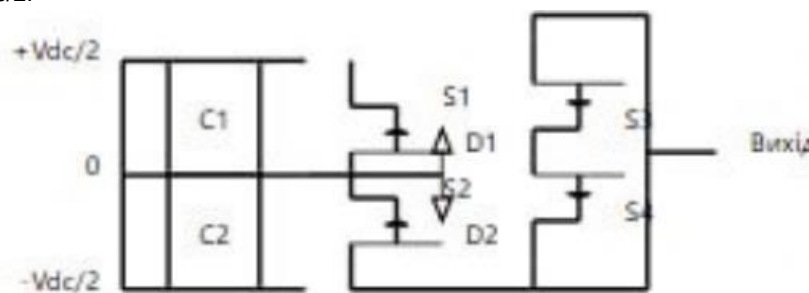


Рисунок 1 – Трирівневий NPC-інвертор

Переваги NPC-інвертора:

- проста структура силової частини;
- відсутність плаваючих конденсаторів;
- можливість роботи з високою частотою комутації;
- зниження напруги на ключах у 2 рази порівняно з дворівневими інверторами.

Недоліки:

- нерівномірний розподіл втрат між силовими ключами;
- проблеми балансування напруги на конденсаторах ланки постійного струму при високих рівнях потужності;
- складність масштабування для більшої кількості рівнів через збільшення кількості фіксуючих діодів;
- обмежена можливість керування реактивною потужністю.

1.2 Інвертор з плаваючими конденсаторами (FC)

Інвертор з плаваючими конденсаторами використовує додаткові конденсатори для фіксації напруги на ключах і формування багаторівневої вихідної напруги (рис. 2). У трирівневій конфігурації кожна фаза містить чотири ключові елементи та один плаваючий конденсатор, заряджений до половини напруги ланки постійного струму. Принцип роботи FC-інвертора полягає у використанні плаваючих конденсаторів для формування проміжних рівнів напруги. Зокрема, у трирівневому інверторі плаваючий конденсатор заряджений до $V_{dc}/2$, що дозволяє формувати вихідну напругу з рівнями $+V_{dc}/2$, 0 та $-V_{dc}/2$ [8].

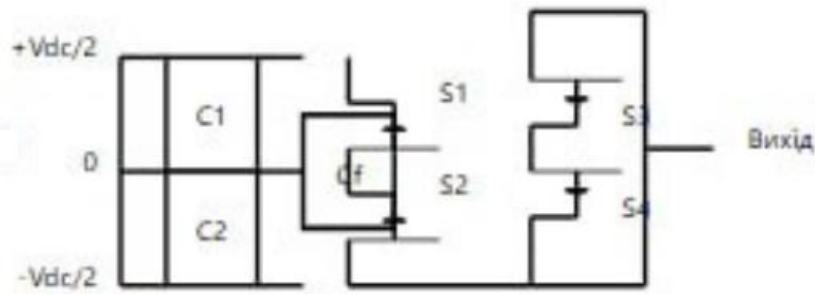


Рисунок 2 – Трирівневий FC-інвертор

Переваги FC-інвертора:

- краще розподілення напруги на ключах порівняно з NPC;
- відсутність фіксуючих діодів;
- Можливість контролю реактивної потужності;
- краща масштабованість для більшої кількості рівнів;
- природна можливість балансування напруги при використанні відповідних алгоритмів керування.

Недоліки:

- складність підтримання балансу напруги на плаваючих конденсаторах;
- збільшення габаритів через наявність додаткових конденсаторів;
- більші втрати при однаковій частоті комутації порівняно з NPC;
- складність попереднього заряду конденсаторів при запуску[9].

1.3 Каскадний H-мостовий інвертор (CHB)

Каскадний H-мостовий інвертор складається з послідовно з'єднаних однофазних H-мостів, кожен з яких має власне ізольоване джерело постійної напруги (рис. 3). Кожен H-міст здатний формувати три рівні вихідної напруги: $+V_{dc}$, 0 та $-V_{dc}$. При послідовному з'єднанні N таких мостів можна отримати $2N+1$ рівнів вихідної напруги.

Переваги CHB-інвертора:

- модульна структура, що спрощує розширення та обслуговування;
- найкраща масштабованість для отримання більшої кількості рівнів;
- можливість роботи при відмові окремих модулів (відмовостійкість);
- найнижчий вміст гармонік при однаковій частоті комутації порівняно з іншими топологіями;
- природна здатність до балансування напруг.

Недоліки:

- необхідність у численних ізольованих джерелах постійної напруги;
- вища вартість при малій кількості рівнів;
- обмеження щодо застосування у трифазних системах через складність живлення;
- складність впровадження в існуючі системи [10].

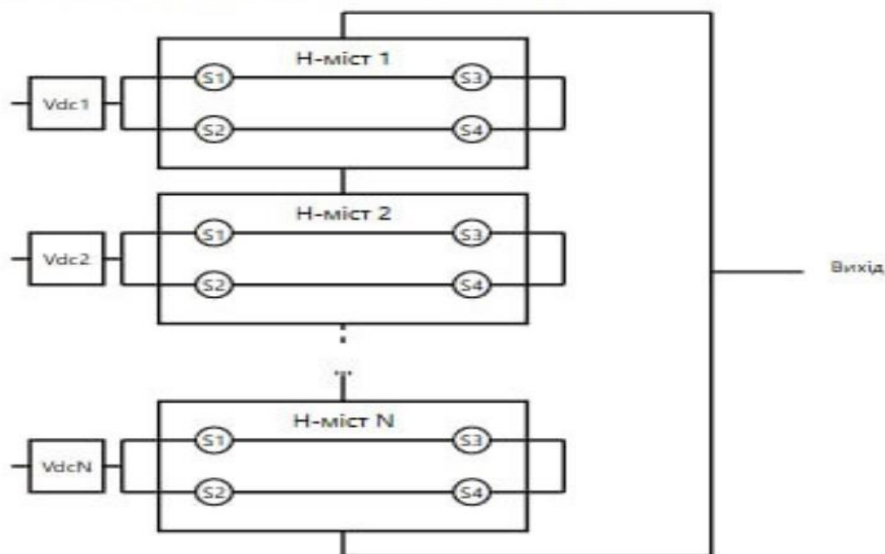


Рисунок 3 – Каскадний H-мостовий інвертор (CHB)

2. Порівняльний аналіз багаторівневих інверторів для систем електропривода

2.1 Енергоефективність

Енергоефективність є одним із ключових параметрів для оцінки перспективності застосування перетворювачів у системах електропривода. Втрати потужності в інверторах можна розділити на дві категорії: статичні (провідні) та динамічні (комутаційні) [2]. Згідно з результатами моделювання та експериментальних досліджень [3], при однаковій частоті комутації та потужності навантаження, багаторівневі інвертори демонструють нижчі сумарні втрати порівняно з дворівневими аналогами. У таблиці 1 наведено порівняльні дані щодо відносних втрат для різних топологій при потужності 100 кВт та частоті комутації 5 кГц.

Таблиця 1 – Відносні втрати в різних топологіях інверторів

Топологія	Порівнянні втрати(%)	Комутаційні втрати(%)	Сумарні втрати(%)
Дворівневий	1.2	1.8	3.0
NPC(3-рівні)	1.3	1.0	2.3
FC(3-рівні)	1.4	0.9	2.3
CHB(5-рівнів)	1.5	0.5	2.0

Каскадні H-мостові інвертори демонструють найнижчі загальні втрати завдяки істотному зниженню комутаційних втрат через меншу напругу на ключах та можливість використання оптимізованих стратегій модуляції [4]. Однак вони мають дещо вищі провідні втрати через більшу кількість активних компонентів у контурі струму.

2.2 Якість вихідної напруги та вміст гармонік

Якість вихідної напруги багаторівневих інверторів безпосередньо впливає на ефективність роботи електропривода, знижуючи додаткові втрати в двигуні, викликані вищими гармоніками. На рис. 4 представлено порівняння коефіцієнта гармонічних спотворень (THD) для різних топологій багаторівневих інверторів при однаковій частоті комутації. Зі збільшенням кількості рівнів вихідної напруги, форма сигналу наближається до синусоїдальної, що призводить до зниження THD. Так, для трирівневих інверторів типове значення THD становить 28-32%, для п'ятирівневих – 15-18%, а для семирівневих – менше 10% [5]. При цьому CHB-інвертори забезпечують найкращі показники якості напруги при однаковій кількості рівнів, особливо при використанні стратегій вибіркової гармонічної компенсації. FC-інвертори за цим параметром займають проміжне положення, а NPC-інвертори показують дещо гірші результати через обмежені можливості керування [6].

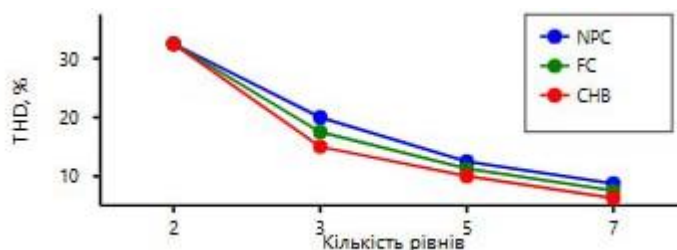


Рисунок 4 – Порівняння THD для різних топологій інверторів

2.3 Складність керування та надійність

Системи керування багаторівневими інверторами мають вирішувати кілька ключових задач: формування оптимальної послідовності комутації ключів, балансування напруг на конденсаторах та забезпечення оптимального розподілу втрат між силовими компонентами [7]. NPC-інвертори вимагають відносно простих алгоритмів модуляції, але потребують додаткових заходів для балансування напруги на конденсаторах ланки постійного струму, особливо при високих потужностях та низькому коефіцієнті потужності навантаження [8]. FC-інвертори характеризуються найскладнішими алгоритмами керування через необхідність активного балансування напруг на плаваючих конденсаторах. Реалізація контролерів для цих топологій вимагає більших обчислювальних потужностей та складнішої сенсорної системи.

CHB-інвертори пропонують найбільшу гнучкість керування завдяки модульній структурі та можливості незалежного керування кожним H-мостом. Це дозволяє реалізувати складні стратегії модуляції та забезпечити відмовостійкість системи.

3. Перспективні напрямки розвитку багаторівневих інверторів.

3.1 Гібридні топології.

Перспективним напрямком розвитку багаторівневих інверторів є розробка гібридних топологій, які поєднують переваги різних базових структур. Наприклад, Active NPC (ANPC) інвертори заміняють фіксуючі діоди на активні ключі, що дозволяє рівномірно розподілити втрати між силовими компонентами та покращити керованість системи. Іншим прикладом є Modular Multilevel Converter (MMC), який поєднує переваги модульності CHB та можливість роботи з єдиним джерелом постійної напруги. MMC складається з послідовно з'єднаних субмодулів, кожен з яких містить напівмостову схему та конденсатор. Ця топологія набуває особливої популярності в системах передачі постійного струму високої напруги (HVDC) та потужних електроприводах.

3.2 Вдосконалені методи модуляції та керування.

Розвиток методів керування багаторівневими інверторами спрямований на вирішення таких задач:

- зниження комутаційних втрат шляхом оптимізації частоти комутації;
- покращення балансування напруг на конденсаторах;
- мінімізація гармонічних спотворень;
- підвищення динамічних характеристик електропривода;

Серед перспективних методів модуляції виділяються:

- багаторівнева просторово-векторна ШІМ (SVPWM);
- селективна гармонічна компенсація;
- гібридні алгоритми модуляції з оптимізацією за кількома критеріями;
- предиктивне керування з моделлю (MPC).

Використання сучасних мікроконтролерів та FPGA дозволяє реалізувати складні алгоритми керування в реальному часі, що забезпечує оптимальну роботу багаторівневих інверторів у різних режимах.

3.3 Застосування широкозонних напівпровідників.

Використання силових ключів на основі широкозонних напівпровідників (SiC, GaN) у багаторівневих інверторах дозволяє істотно знизити комутаційні втрати, підвищити частоту комутації та зменшити габарити систем.

4 Практичні аспекти впровадження багаторівневих інверторів у системи електропривода.

4.1 Економічна ефективність.

Хоча початкова вартість багаторівневих інверторів вища порівняно з традиційними дворівневими системами, сукупна вартість володіння (TCO) може бути нижчою завдяки підвищенню енергоефективності, зниженню вимог до фільтрації та охолодження, а також підвищенню надійності. Розрахунки показують, що для електроприводів потужністю понад 100 кВт трирівневі NPC-інвертори забезпечують найкраще співвідношення ціна/якість. Для систем потужністю 500 кВт і вище оптимальними з економічної точки зору стають п'ятирівневі системи.

4.2 Основні області застосування.

Високовольтні електроприводи (4.16–13.8 кВ)

Тягові електроприводи для залізничного транспорту

Електроприводи для морських та портових застосувань

Електроприводи для відновлюваної енергетики

Висновки. Багаторівневі інвертори мають значні переваги перед традиційними дворівневими перетворювачами. NPC-інвертори мають простішу структуру та меншу вартість, але обмежені можливості масштабування. FC-інвертори забезпечують кращий розподіл напруги на ключах, але вимагають складніших алгоритмів керування. СНВ-інвертори демонструють найкращі показники якості вихідної напруги та масштабованості, але потребують численних ізольованих джерел живлення.

Перспективними напрямками розвитку є:

- розробка гібридних топологій;
- вдосконалення методів модуляції та керування;
- застосування широкозонних напівпровідників;
- Інтеграція з системами енергозбереження.

Список використаних джерел

1. Rodriguez J., Lai J.-S., Peng F.Z. Multilevel inverters: a survey of topologies, controls, and applications. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2022. Vol. 49, no. 4. P. 724–738.
2. Kouro S., Malinowski M., Gopakumar K., Pou J., Franquelo L.G., Wu B., Rodriguez J., Pérez M.A., Leon J.I. Recent advances and industrial applications of multilevel converters. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2023. Vol. 57, no. 8. P. 2553–2580. DOI: 10.1109/TIE.2023.2049711
3. Nabae A., Takahashi I., Akagi H. A new neutral-point-clamped PWM inverter. IEEE Transactions on Industry Applications. 1981. Vol. IA-17. P. 518–523.
4. Lesnıcar A., Marquardt R. An innovative modular multilevel converter topology suitable for a wide power range. IEEE Transactions on Industry Applications. 2003. Vol. 39, no. 3. P. 759–767.
5. Kolb M., Kammerer M. Cascaded control system of the modular multilevel converter. Semantic Scholar. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Cascaded-Control-System-of-the-Modular-Multilevel-Kolb-Kammerer/4a2510507613dbea68121a2d85aa6a91b449368f>
6. Guan X., Li Y. An extremely high efficient three-level active SiC inverter. Semantic Scholar. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/An-Extremely-High-Efficient-Three-Level-Active-SiC-Guan-Li/b285ab8fd632b9967a745db997be54af834c80f8>
7. Dai X., Wang Z., Liu Y. A novel fault-let-through energy based fault location for LVDC distribution networks. The IET Electric Power Applications. 2023. Vol. 17, no. 5. P. 123–130. DOI: 10.1049/ell2.13175
8. Zhao B., Liu Z., Liu Y., Zhang L., Xu L., Xu Z. A novel modular multilevel converter topology with reduced submodules. Energies. 2020. Vol. 13, no. 23. P. 6014.

УДК 629.12:629.56

*Гетманцева В.С., Черніков М.О., здобувачі,**Волянська Я. Б., д.т.н.**Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв*

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ МЕТОДІВ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ У СЕРЕДОВИЩАХ MATLAB/SIMULINK ТА SCILAB/XCOS

У сучасній інженерній практиці моделювання електромеханічних систем виступає критично важливою складовою етапів розробки, верифікації та оптимізації складних технічних об'єктів, зокрема автоматизованих систем керування, електроприводів, робототехнічних комплексів та систем енергетичного забезпечення. З огляду на високі вимоги до точності, надійності та ефективності функціонування таких систем, застосування інструментів комп'ютерного моделювання дозволяє суттєво підвищити якість інженерних рішень, зменшити витрати на розробку апаратної частини та пришвидшити цикл створення дослідних зразків. Саме тому комп'ютерне моделювання на сьогодні є невід'ємною частиною інженерної освіти, наукових досліджень та виробничої практики.

Особливе місце серед інструментів моделювання займають середовища MATLAB / Simulink та Scilab / Xcos. MATLAB / Simulink, як визнаний у світовій інженерній спільноті комерційний продукт, характеризується розвиненим інтерфейсом, великою бібліотекою функціональних блоків, підтримкою численних галузевих стандартів, а також інтеграцією з мовами програмування та апаратними платформами. Його застосування охоплює найрізноманітніші сфери – від освіти та академічних досліджень до промислового проєктування та тестування в режимі реального часу. Утім, одним із головних обмежень використання MATLAB / Simulink є висока вартість ліцензійного забезпечення, що створює бар'єри для широкого впровадження у закладах з обмеженим фінансуванням, зокрема у системі освіти країн із перехідною економікою.

На цьому тлі зростає зацікавлення безкоштовними альтернативами, серед яких особливу увагу привертає середовище Scilab / Xcos. Воно є проєктом з відкритим вихідним кодом, що забезпечує користувачам можливість розробки динамічних моделей за допомогою візуального середовища, подібного до Simulink. Хоча функціональність Scilab / Xcos дещо поступається MATLAB / Simulink, цей інструмент залишається перспективним завдяки своїй доступності, відкритості та можливості модифікації під конкретні потреби користувача. Для навчальних цілей, дослідницьких проєктів та інженерних задач із невисокими вимогами до апаратної підтримки він може стати ефективним і економічно доцільним вибором.

В умовах постійного зростання потреб у доступному, гнучкому та функціонально ефективному програмному забезпеченні виникає нагальна потреба в об'єктивному, структурованому порівнянні можливостей, переваг та обмежень згаданих середовищ. При цьому слід враховувати такі аспекти, як точність обчислень, простота побудови моделей, наявність готових бібліотек, можливості інтеграції з іншими системами, підтримка апаратного моделювання тощо. Варто зауважити, що попри наявність окремих прикладних досліджень у цій сфері, питання системного порівняльного аналізу MATLAB / Simulink та Scilab / Xcos у контексті моделювання електромеханічних систем усе ще залишається недостатньо висвітленим у науковій літературі.

Зважаючи на викладене, проведення дослідження, спрямованого на комплексний аналіз ефективності застосування MATLAB / Simulink та Scilab / Xcos для моделювання електромеханічних систем, є актуальним з наукової, освітньої та прикладної точок зору. Результати такого аналізу можуть слугувати основою для вибору оптимального програмного інструментарію залежно від специфіки задачі, наявних ресурсів, вимог до точності моделювання та подальшої інтеграції моделей у реальні системи управління.

Метою дослідження є здійснення порівняльного аналізу середовищ MATLAB / Simulink та Scilab / Xcos у контексті моделювання електромеханічних систем, з акцентом на виявлення їхніх функціональних можливостей, переваг і недоліків, а також оцінку доцільності використання кожного з інструментів для вирішення різних класів інженерних, наукових і освітніх задач. Результати дослідження спрямовані на формування обґрунтованих підходів до вибору програмного середовища залежно від специфіки моделювання та вимог до технічного забезпечення. У сучасній інженерній практиці моделювання електромеханічних систем виступає критично важливою складовою етапів розробки, верифікації та оптимізації складних технічних об'єктів. Використання MATLAB / Simulink дозволяє досягти високої точності відтворення динаміки об'єкта, забезпечити гнучкість у реалізації складних схем керування та зручність графічного інтерфейсу з широкими можливостями візуалізації результатів/

Xcos – це графічне інтерактивне середовище, що входить до складу системи математичного моделювання Scilab і призначене для проєктування систем в галузях автоматики, механіки, гідравліки та електроніки. У Xcos модельований об'єкт представляється блок-схемою, яка включає блоки елементів системи та зв'язки між ними, що дозволяє створювати ієрархічні структури з вкладеними підсистемами [1].

Scilab є безкоштовним програмним забезпеченням з відкритим кодом, що робить його привабливим для студентів та викладачів, тоді як MATLAB потребує ліцензії, через що частіше використовується в промисловості. Обидва середовища мають схожу структуру і підтримують обчислення, але MATLAB має розширені можливості оптимізації, що особливо корисно в інженерному проєктуванні [2]. Моделювання в середовищі MATLAB Simulink

дозволяє наочно дослідити вплив різних параметрів електромеханічної системи на її динаміку. Зокрема, за допомогою інтеграції структурних блоків можна формувати різні варіанти схем, моделювати переходи, а також виявляти критичні режими роботи [3]. Математичне моделювання електроприводів у середовищі MATLAB дозволяє ефективно аналізувати динамічні властивості систем, оцінювати їхню поведінку в аварійних режимах та перевіряти коректність спрощень у математичних моделях. Застосування структурних схем спрощує опис складних систем і дозволяє моделювати як лінійні, так і нелінійні елементи [3]. Моделювання систем із ПІ-регуляторами в середовищі Xcos демонструє можливість реалізації основних принципів автоматичного керування із використанням типових блоків. Перевагою є спрощений доступ до візуального середовища та інтеграція з Scilab-редактором [4].

На рис. 1 представлено модель електроприводу постійного струму зі зворотним зв'язком, реалізовану в середовищі MATLAB / Simulink. Для порівняння, на рис. 2 зображено аналогічну систему, змодельовану у вільному середовищі Scilab / Xcos із використанням ПІ-регулятора.

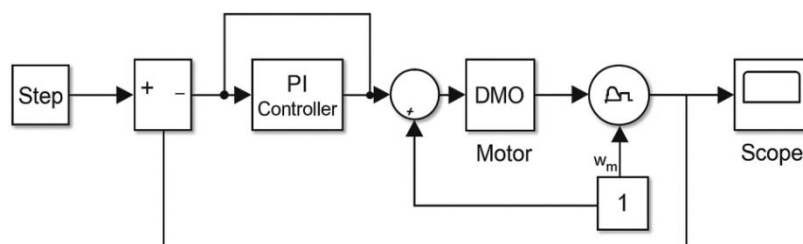


Рисунок 1 – Модель електроприводу постійного струму у середовищі MATLAB / Simulink.

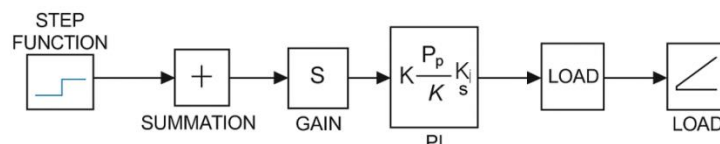


Рисунок 2 – Модель керування навантаженням з ПІ-регулятором у середовищі Scilab / Xcos.

MATLAB / Simulink ефективно моделює складні електромеханічні системи за умов зміни параметрів та наявності збурень. Сумісність із Simscape дозволяє реалізувати фізично точні моделі, у тому числі з тепловими, механічними та магнітними впливами. Система імітаційного моделювання XcosonWeb є перспективним хмаро орієнтованим засобом навчання бакалаврів електромеханіки моделювання технічних об'єктів. Реалізація у XcosonWeb повної функціональності ScilabXcos створює умови для переходу у навчання бакалаврів електромеханіки моделювання технічних об'єктів до використання мобільних Інтернет-пристроїв [5]. Середовище підтримує ієрархічне моделювання, що дозволяє створювати складні моделі з вкладеними підсистемами, а також має вбудовані інструменти для аналізу результатів моделювання [6]. Дослідницькі роботи зосереджені або на реалізації моделей в одному з середовищ, або на загальному описі функціоналу. Однак систематичне порівняння MATLAB / Simulink та Scilab / Xcos за критеріями точності, обчислювальної ефективності, доступності та зручності побудови моделей досі є недостатньо представленим у науковому дискурсі. Це формує потребу в комплексному аналізі можливостей обох платформ для моделювання електромеханічних систем. У науковій та освітній спільноті досі немає єдиної думки щодо того, яке програмне середовище — MATLAB / Simulink чи Scilab / Xcos — є оптимальним для моделювання електромеханічних систем (ЕМС). Це зумовлено відмінностями в функціональних можливостях, вартості, гнучкості, технічній підтримці та зручності використання кожного з цих інструментів. Обидва програмні продукти мають як сильні сторони, так і певні обмеження, що ускладнює формування однозначного висновку щодо їх переваг.

Основні фактори, що ускладнюють остаточний вибір, включають:

- **Різноманітність потреб користувачів.** MATLAB / Simulink – це комерційне середовище з розвинутою екосистемою, широким набором бібліотек і високим рівнем підтримки. Воно є пріоритетним вибором для інженерів та дослідників, які працюють із комплексними моделями та мають відповідне фінансування. Scilab / Xcos, натомість, є безкоштовним програмним забезпеченням з відкритим кодом, що забезпечує базову функціональність для побудови моделей середнього рівня складності. Такий підхід робить його особливо привабливим для студентів та освітніх закладів із обмеженими ресурсами.

- **Функціональні можливості та підтримка.** MATLAB / Simulink пропонує велику кількість вбудованих бібліотек (зокрема Simscape, SimPowerSystems), потужну документацію та підтримку користувачів. Scilab / Xcos має обмежені бібліотеки та менш формалізовану підтримку, однак активно розвивається завдяки внеску спільноти.

- **Вартість і доступність.** Висока ціна ліцензії MATLAB / Simulink є одним із головних бар'єрів для широкого використання в освітньому середовищі. У цьому контексті Scilab / Xcos виступає як вільна альтернатива, що робить моделювання доступним для ширшого кола користувачів.

• **Технічні відмінності та сумісність.** Обидва середовища використовують графічний інтерфейс для блочного моделювання, проте моделі, створені в одному середовищі, несумісні з іншим. Це створює додаткові труднощі при переході між платформами та ускладнює спільну роботу. Кожне середовище має свої переваги для окремих класів задач, тому вибір інструменту залежить від конкретних вимог проекту.

Таким чином, відсутність єдиної думки щодо вибору середовища моделювання ЕМС зумовлена сукупністю чинників: різним функціональним наповненням, ціною, рівнем підтримки та доступністю ресурсів. Кожен інструмент має свою нішу застосування, і доцільність його використання визначається конкретними технічними та фінансовими умовами.

MATLAB / Simulink. MATLAB / Simulink – провідне комерційне середовище моделювання, яке надає доступ до широкого набору спеціалізованих бібліотек, таких як Simscape і SimPowerSystems. Вони дозволяють точно відтворювати поведінку складних електромеханічних об'єктів. Інтуїтивний графічний інтерфейс, гнучке налаштування параметрів моделі, можливість автоматичної генерації коду та велика кількість навчальних ресурсів сприяють швидкому впровадженню середовища в інженерну практику.

Scilab / Xcos. Scilab / Xcos є відкритим безкоштовним середовищем для моделювання динамічних систем. Воно надає базові інструменти для створення моделей, що робить його придатним для навчальних цілей та реалізації простих технічних задач. Проте, порівняно з MATLAB / Simulink, Xcos має обмежену кількість бібліотек, нижчий рівень технічної підтримки та менше прикладів готових моделей, що може бути критичним для складних проєктів.

Таблиця 1 – Порівняльна характеристика середовищ MATLAB / Simulink та Scilab / Xcos для моделювання електромеханічних систем

Характеристика	MATLAB / Simulink	Scilab / Xcos
Тип ліцензії	Комерційне, платне ПЗ з високою вартістю	Відкрите, безкоштовне ПЗ
Інтерфейс користувача	Графічне блочне моделювання з інтуїтивним UI, багатий набір блоків	Схожий інтерфейс, менше блоків
Функціональність	Широкі бібліотеки для моделювання ЕМС, систем керування, електроприводів тощо	Основні компоненти для моделювання ЕМС, функціонал поступово розширюється
Підтримка користувачів	Офіційна підтримка, велика кількість навчальних матеріалів	Менше офіційної підтримки, але активна спільнота користувачів
Сумісність та інтегрованість	Висока сумісність з продуктами MATLAB, автоматична генерація коду, інтеграція з апаратурою	Обмежена інтеграція, відкритий код, створення власних блоків
Вартість	Висока (ліцензія + додаткові тулбокси можуть коштувати тисячі доларів)	Безкоштовне
Продуктивність і стабільність	Висока продуктивність, менше технічних проблем	Іноді виникають складності з налаштуванням, потребує більше часу на освоєння
Поширеність у професійній сфері	Широко використовується в промисловості та наукових дослідженнях	Часто використовується в освіті та при обмеженому бюджеті
Можливість обміну моделями	Потрібна ліцензія для кожного користувача проєкту	Легке розповсюдження завдяки відкритості

У таблиці 1 представлені основні переваги та недоліки кожного середовища для моделювання електромеханічних систем, базуючись на їх функціональних можливостях, вартості, підтримці та зручності використання.

Середовище MATLAB / Simulink широко використовується для моделювання регульованих електроприводів, зокрема завдяки бібліотекам Simulink і SimPowerSystems, що дозволяють створювати моделі електромеханічних систем [7]. Моделювання пристроїв силової електроніки в MATLAB Simulink базується на принципах візуально-орієнтованого програмування, де функціональні моделі створюються шляхом з'єднання між собою компонентів-блоків. Такий підхід дозволяє ефективно досліджувати лінійні та нелінійні динамічні системи, що є особливо корисним для аналізу електромеханічних систем [8]. Воно широко використовується для дослідження електроприводів з вентильними перетворювачами завдяки високій точності та можливості врахування нелінійностей. Однак стандартні бібліотеки мають обмеження у відображенні фізичних процесів, що обумовлює необхідність створення більш адекватних моделей, зокрема для систем типу ТПН-АД [9]. Математичне моделювання електромеханічних систем є ключовим інструментом для аналізу та оптимізації їхньої динаміки. Застосування чисельних методів дозволяє враховувати нелінійності та складні взаємодії між компонентами системи, що забезпечує більш точне відображення реальних процесів [10]. Порівняльний аналіз показує, що

MATLAB / Simulink краще справляється з моделюванням нелінійних процесів, тоді як Xcos дозволяє гнучко підключати зовнішні бібліотеки та реалізовувати експериментальні моделі із використанням Scilab-коду. Моделювання ПІ-регулятора з використанням адаптивних методів інтегрування у середовищі Simulink забезпечує вищу точність розрахунків, проте для статичних систем Xcos також показує достатню точність у розрахунках із фіксованим кроком інтегрування. У середовищі Xcos можна ефективно моделювати трансформаторні системи, з урахуванням магнітного насичення, втрат у сталі та динаміки навантаження. Результати розрахунків добре узгоджуються з аналітичними залежностями та експериментальними даними.

Для вибору оптимального середовища моделювання слід враховувати сумісність з апаратним забезпеченням, можливість масштабування моделей, рівень технічної підтримки, наявність довідкових матеріалів та швидкодію середовища. Зіставлення цих характеристик дозволяє обґрунтовано визначити, яке з середовищ є доцільнішим для конкретної задачі.

Висновки. У результаті проведеного аналізу встановлено, що обидва програмні середовища – MATLAB / Simulink та Scilab / Xcos – здатні ефективно виконувати задачі моделювання електромеханічних систем. MATLAB / Simulink забезпечує високу точність обчислень, широкий функціонал і потужну інтеграцію з апаратними платформами, що робить його оптимальним вибором для складних промислових і науково-дослідних проєктів. Scilab / Xcos, своєю чергою, демонструє достатній рівень функціональності для освітніх і прикладних задач середньої складності, будучи при цьому доступною альтернативою завдяки відкритому коду та відсутності ліцензійних обмежень. Кінцевий вибір середовища моделювання має базуватись на конкретних технічних, фінансових і організаційних умовах: складності проєкту, необхідній точності моделювання, доступності ресурсів та вимогах до інтеграції. Представлений порівняльний аналіз може слугувати орієнтиром для фахівців при виборі програмного забезпечення для проєктування, дослідження та навчання в галузі електромеханіки та автоматизації.

Список використаних джерел

1. Дубовий Ю. Ю., Юхимчук С. В. Імітаційне моделювання в системі Scilab / Xcos [Електронний ресурс].
2. Marques G. L., Ferreira J. V. A., Magnabosco G. R., Pedro J. A. C., DeOliveira A. M. Comparison between Scilab and MATLAB in the context of engineering. *Anais do Workshop de Micro-ondas*. – 2023. – Т. 1, № 7. – С. 76–77.
3. Чорний Є. І., Бурдільна С. В. Математичне моделювання системи електропривода ТПН-АД у пакеті MATLAB Simulink // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – 2017. – № 2 (33). – С. 33–37.
4. Толочко О. І. Моделювання та аналіз електромеханічних систем в MATLAB: методичні вказівки до виконання лабораторних робіт для студентів спеціальності 141 – “Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка”, спеціалізації “Електромеханічні системи автоматизації та електропривод” / О. І. Толочко. – Київ: НТУУ “КПІ”, 2017. – 235 с.
5. Модло Є. О., Семеріков С. О. Xcos on Web як перспективний засіб навчання моделювання технічних об’єктів бакалаврів електромеханіки // *Proceedings of the 5th Workshop on Cloud Technologies in Education (CTE 2017)*. – 2018. – Vol. 2168. – С. 34–41.
6. Голодний І. М., Червінський Л. С., Жильцов А. В., Санченко О. В., Романенко О. І. Моделювання регульованого електропривода: підручник. – Київ: Аграр Медіа Груп, 2019. – 266 с.
7. Дубовой В. М., Юхимчук М. С., Лещенко Ю. Я. Імітаційне моделювання в системі Scilab / Xcos: електронний навчальний посібник комбінованого (локального та мережного) використання. – 2-е вид., переробл. та доповн. – Вінниця: ВНТУ, 2024. – 119 с.
8. Денисюк С. П., Дерев’янко Д. Г. Промислова електроніка. Моделювання пристроїв силової електроніки в MATLAB Simulink: практикум. Навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавра за освітньою програмою «Інжиніринг автоматизованих електротехнічних комплексів» / С. П. Денисюк, Д. Г. Дерев’янко. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 95 с.
9. Андрющенко О. А., Бойко А. О., Бересан О. О. Математичне моделювання системи електроприводу ТПН-АД у пакеті MATLAB Simulink // *Мат. моделювання*. – 2009. – № 2 (21). – С. 57–60.
10. Загирняк М. В., Сердюк А. А. Математичні моделі та особливості чисельних розрахунків динаміки електроприводів: монографія. – Кременчук: КрНУ, 2015. – 200 с.

УДК 629.12:629.56

Козлов О.І., Лебідь О.О., здобувачі,

Волянський С. М., к.т.н.

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КОЛИВАНЬ НАПРУГИ ЖИВЛЕННЯ НА ДИНАМІКУ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

У сучасних електротехнічних системах надійність роботи електроприводів суттєво залежить від якості живлення. Незважаючи на те, що у більшості досліджень приймається ідеальне джерело напруги, у реальних умовах електроприводи працюють у середовищі, де напруга піддається різного роду коливанням [1]. Ці коливання можуть виникати внаслідок коротких замикань, пуску потужних споживачів, грозових розрядів або порушень у роботі

трансформаторів і регульованих пристроїв [2]. Така нестабільність живлення може значно впливати на динамічну електропривода, викликаючи перевантаження, погіршення регулювання швидкості або навіть аварійні зупинки.

Актуальність цього дослідження зумовлена тим, що при проектуванні та аналізі електроприводів часто ігнорується вплив нестабільного енергопостачання. Унаслідок цього розроблені системи можуть виявитися чутливими до реальних режимів експлуатації [3]. Особливо критичним є поєднання таких явищ, як провал або перенапруга, із моментом реверсування – це погіршує динаміку електропривода.

Метою цієї роботи є аналіз впливу змін напруги живлення – таких як провали, імпульсні перенапруги та перенапруги – на динамічні характеристики електропривода. Результати дослідження мають допомогти краще розуміти поведінку електроприводу в умовах нестабільного енергопостачання.

До основних типів коливань напруги належать.

Провали напруги – це короткочасне зниження рівня напруги до 10–90 % номінального значення на період від 0,5 до 60 секунд [4, 5]. Основними причинами провалів є запуск великогабаритного електрообладнання, короткі замикання в електромережі або несправності в трансформаторах. Наслідками є зниження крутного моменту електродвигуна, нестабільна робота керованих систем, можливе аварійне зупинення обладнання.

Імпульси напруги – це дуже короткі (від наносекунд до мілісекунд) різкі підвищення напруги, що перевищують номінальне значення. Причинами є: комутаційні процеси, розряди блискавки, індуктивні навантаження [6]. Шкідливі для електроніки, викликають передчасне старіння елементів, можливі збої в роботі систем керування.

Перенапруги – це стабільне перевищення напруги понад 110 % номінального рівня протягом тривалого часу (від кількох секунд до годин). Часто виникають через неправильне регулювання напруги в мережі, аварії або неякісну трансформацію. Викликають пошкодження ізоляції обмоток двигуна, перевантаження та перегрівання обладнання, скорочення ресурсу електропривода [7].

У даній роботі представлено п'ять режимів роботи електропривода:

- режим роботи 1 – ідеальні початкові умови;
- режим роботи 2 – імпульси та провали напруги;
- режим роботи 3 – провал напруги під час реверсу;
- режим роботи 4 – перенапруга;
- режим роботи 5 – перенапруга під час реверсу.

Модель досліджуваного електропривода представлена на рис.1 [8] та складається з 3^хфазного налаштовуваного джерела живлення «Three-PhaseProgrammableVoltageSource» 400 В, 50 Гц. У режимі 1 – це ідеальне джерело живлення. У режимах 2–5 встановлюються імпульси і провали за часом.

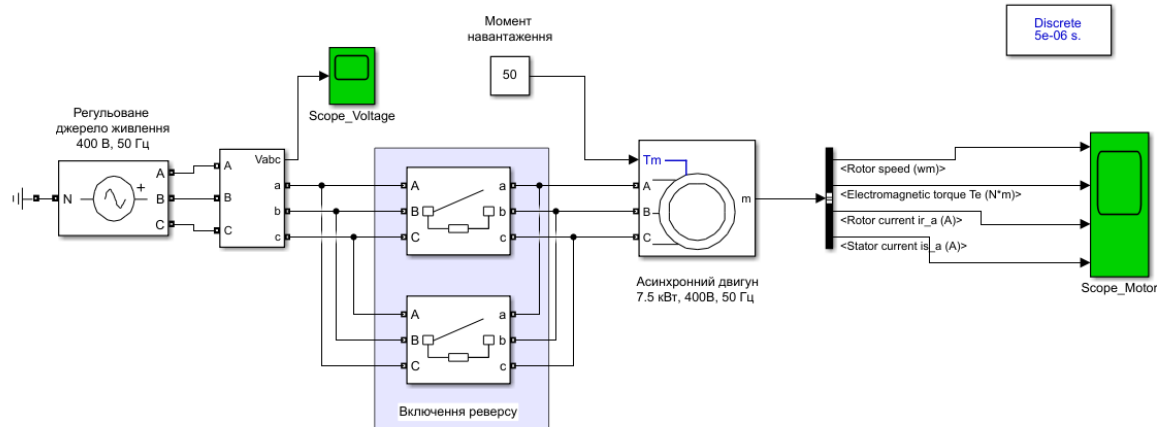


Рисунок 1 – Модель асинхронного електропривода з реверсивним включенням в середовищі MATLAB / Simulink

Меню налаштувань імпульсів, провалів та перевантажень напруги в блоці «Three-PhaseProgrammableVoltageSource» представлено на рис. 2. Де верхня строка – це відносні величини від заданої амплітуди напруги (400 В), а нижня строка – момент часу, що відповідає відносній величині. (Складають пари. У момент часу 0 с, амплітуда = 1 в. о. (тобто 400 В).

☐ Variation on phase A only

Amplitude values (pu): [1 3 1 3 1 0.7 1]

Time values: [0 0.2 0.2003 0.2017 0.202 0.45 0.55]

☐ Fundamental and/or Harmonic generation:

Рисунок 2 – Меню налаштувань імпульсів, провалів та перевантажень напруги в блоці «Three-PhaseProgrammableVoltageSource»

У момент часу 0.2 амплітуда напруги стає 3 в. о., тобто 1200 В і триватиме 0.0003 с до моменту часу 0.2003. де знову стає амплітудою 1 в. о. Таким чином і моделюються в даній моделі імпульси, провали та перенапруги [9], що буде видно на осцилограмах. На моделі, після генератору напруги йде 3^хфазний вимірник напруги «Three-Phase V-I Measurement», блок перемикачів «Three-PhaseBreaker» (пряме включення електроприводу), «Three-PhaseBreaker» (реверсивне включення електроприводу) які моделюють реверсне включення. З 0 до 0.3 с пряме включення; з 0.3 с – зворотне включення. Далі блок асинхронного двигуна з встановленими параметрами «AsynchronousMachine SI Units» – 7 кВт, 400В, 50 Гц, 1440 об/хв. За допомогою «BusSelector» знімаються параметри двигуна, а саме швидкість двигуна (рад/с), електромагнітний момент (Н*м), а також струм ротора та статора(A) [9].

Режими роботи електропривода в умовах коливань напруги

Режим 1 – початкові умови. Цей режим є базовим та містить ідеальне трифазне джерело живлення без коливань напруги. На його основі здійснюється порівняння з іншими режимами. Двигун працює в умовах стабільної напруги 400 В, 50 Гц. Реверс вмикається на 0.3 с моделювання. Швидкість, момент і струми статора та ротора демонструють стабільну динаміку. Результати моделювання представлені на рис. 3.

Режим 2 – імпульси та провали напруги. У цьому режимі реалізовані короточасні імпульси напруги до 1200 В у момент 0,2–0.202 с та провали до 280 В у момент 0.45–0.55 с. Такі зміни викликають коливання швидкості обертання, моменту і струмів. Імпульсні перенапруги можуть призводити до часткових розрядів в ізоляції обмоток двигуна, що з часом спричиняє деградацію ізоляції та зниження надійності обладнання. Провали напруги можуть викликати великі пускові струми та моменти, що впливають на стабільність роботи двигуна [10].

Режим 3 – провал напруги в момент реверсу. Провал напруги в цій моделі накладаються саме на момент реверсу (0.29–0.39 с), що спричиняє різкі зміни моменту та збої у стабілізації швидкості. В результаті маємо нестійкі динамічні процеси у фазі зміни напрямку обертання. Результати моделювання представлені на рис. 4.

Режим 4 – перенапруга. Модель демонструє вплив перенапруги до 520 В у момент 0.45–0.55 с. Висока напруга спричиняє збільшення струмів і моменту, що може бути шкідливим для електродвигуна. Є ризик перегріву та механічних навантажень.

Режим 5 – перенапруга в момент реверсу. Перенапруга накладається на момент реверсу (0.29–0.39 с). Результатом є нестабільна поведінка системи – коливання моменту, струмів та швидкості. Модель показує небезпеку одночасного впливу кількох негативних чинників.

Результати моделювання зведені до таблиці 1. Початкові та найбільш характерні результати показані на рис. 3 та 4.

Таблиця 1 – Відносні зміни динамічного режиму відносно від початкових умов

Режими роботи	Час реверсу	Швидкість ротора в встановленому режимі	Швидкість ротора в момент реверсу	Момент обертання в встановленому режимі	Момент обертання в момент реверсу
Режим 2	0 %	Коливання +-10 %	0 %	Коливання +-120 %	0 %
Режим 3	+8 %	0 %	-10 %	0 %	-50 %
Режим 4	0 %	Коливання +-5 %	0 %	Коливання +-90 %	0 %
Режим 5	-10 %	0 %	+10 %	0 %	+15 %

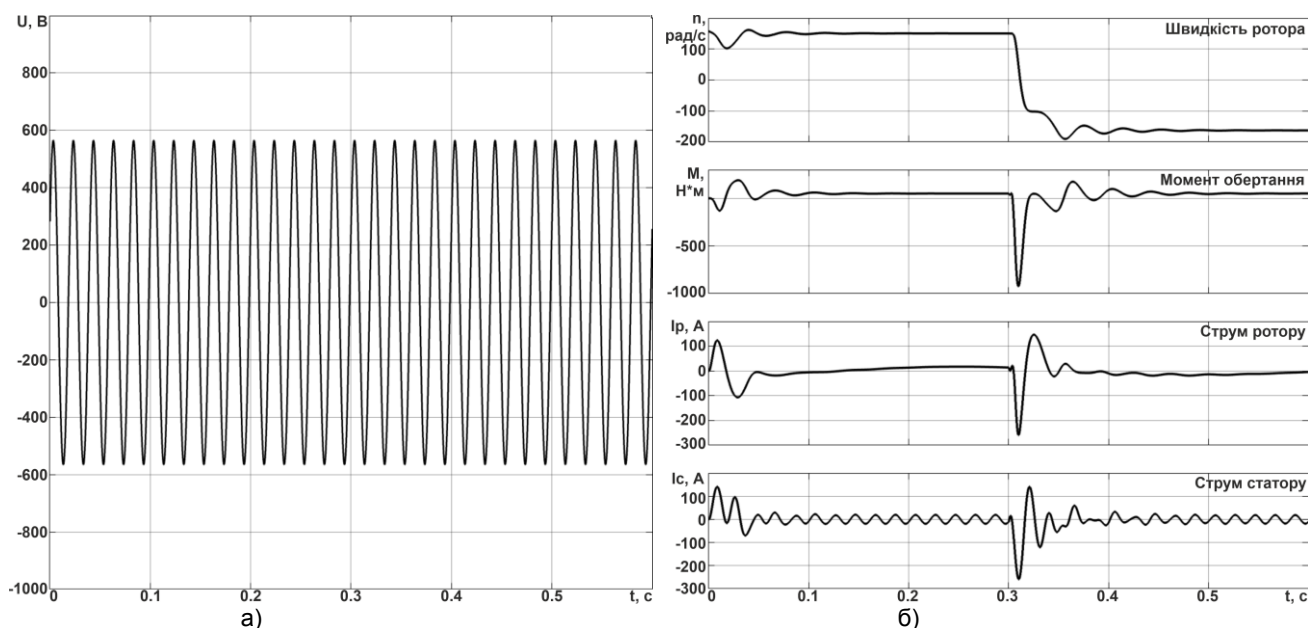
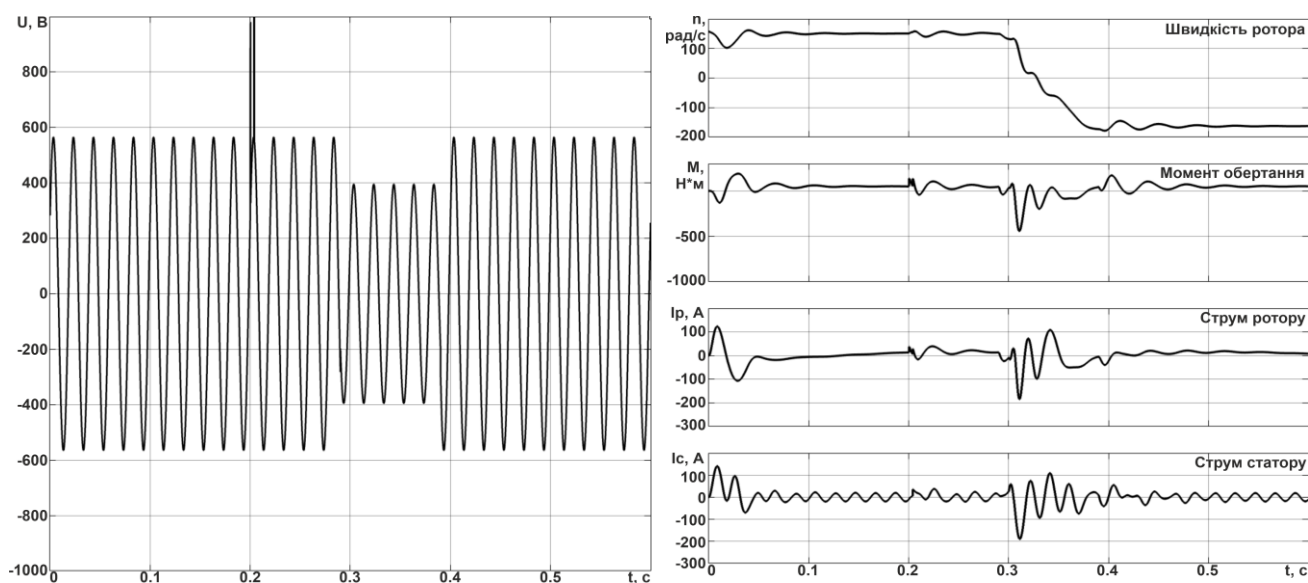


Рисунок 3 – результати моделювання роботи електропривода в режимі 1:
а) – напруга живлення; б) – динамічні характеристики електропривода



а) б)
Рисунок 4 – результати моделювання роботи електропривода в режимі 3:
а) – напруга живлення; б) – динамічні характеристики електропривода

Аналіз впливу коливань напруги на динаміку електроприводу

Аналіз результатів моделювання показує, що коливання напруги істотно впливають на роботу електропривода. Провали напруги призводять до втрати моменту та зниження швидкості, імпульси – до короточасних перевантажень. Реверс у поєднанні з нестабільною напругою викликає найбільші відхилення динамічних параметрів. Перенапруги є особливо небезпечними для ізоляції двигуна та можуть призводити до аварій. Таким чином, стабільність напруги живлення є ключовим чинником надійної роботи електроприводу.

Висновки

У ході роботи було досліджено вплив різних типів коливань напруги живлення на динаміку електропривода. Результати показали, що нестабільність напруги призводить до погіршення динамічних характеристик, нестабільної роботи системи та можливих перевантажень [11]. Рекомендації та напрямки зменшення впливу коливань напруги: використання джерел безперебійного живлення або стабілізаторів напруги для забезпечення постійного рівня живлення; інтеграція систем моніторингу якості електроенергії для своєчасного виявлення аномалій та прийняття коригуючих дій; підвищення якості енергопостачання на рівні підприємства шляхом модернізації внутрішніх мереж і трансформаторних підстанцій.

Впровадження вказаних заходів дозволить значно підвищити надійність та довговічність систем, зменшити кількість аварійних ситуацій і знизити витрати на технічне обслуговування. Ці фактори слід обов'язково враховувати при проектуванні та експлуатації систем електроприводу.

Список використаних джерел

1. Alonso Orcajo, G., Cano, J. M., Rojas, C. H., Melero, M. G., Cabanas, M. F., & Pedrayes, F. (2016). Voltage sags in industrial systems. *Renewable Energy and Power Quality Journal (RE&PQJ)*, (14), 864.
2. Sangepu, Raghavendra & Muni, T Vijay. (2015). Effect of Power Quality Issue SimPower System and Its Mitigation by Power Electronics Devices. 28.
3. Masoud Aliakbar Golkar. Power quality in electric networks: monitoring, and standards. *RE & PQJ*, Vol. 1, No.5.
4. EN 50160:2010. Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks. – Brussels: CENELEC, 2010. – 34 p.
5. IEEE Std 1159-2019. IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality. – New York: IEEE Standards Association, 2019. – 94 p.
6. IEC 61000-4-5:2017. Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-5: Testing and measurement techniques – Surge immunity test. – Geneva: IEC, 2017. – 55 p.
7. Masoum M.A.S., Fuchs E.F. *Power Quality in Power Systems and Electrical Machines*. – 2nd ed. – Amsterdam: Academic Press, 2015. – 744 p.
8. Толочко О. І. Моделювання електромеханічних систем. Математичне моделювання систем асинхронного електроприводу. Навч. посіб. – Київ: НТУУ «КПІ», 2016. – 150 с.
9. Волянський С. М., Волянська Я. Б. Моделювання електромеханічних систем. Навч. посіб. / За ред. О.А. Онищенко. – Миколаїв: Іліон, 2018. – 246 с.
10. Zhang D., Liu T. Effects of voltage sag on the performance of induction motor based on a new transient sequence component method // *CES Transactions on Electrical Machines and Systems*. – 2019. – Vol. 3, No. 3. – P. 316–324.
11. Ghaseminezhad M., Doroudi A., Hosseini S.H., Jalilian A. Analysis of voltage fluctuation impact on induction motors by an innovative equivalent circuit considering the speed changes // *IET Generation, Transmission & Distribution*. – 2017. – Vol. 11, No. 2. – P. 512–519.

УДК 621.3

Новогрецький С.М., к.т.н., доц., Баришник Ю.М., аспірант

Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, м. Миколаїв

ВПЛИВ ДЕМПФЕРНОЇ ОБМОТКИ НА СТАТИЧНУ СТІЙКІСТЬ ПАРАЛЕЛЬНОЇ РОБОТИ СИНХРОННИХ ГЕНЕРАТОРІВ

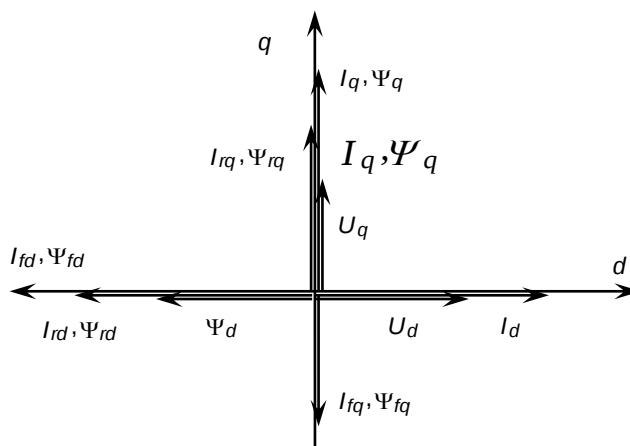
В автономних та суднових електростанціях важливим питанням є забезпечення максимального ступеня статичної стійкості роботи в будь-яких робочих режимах [1-9]. Вирішення цієї задачі забезпечує найшвидше гасіння малих електромеханічних коливань, викликаних зовнішніми малими короткочасними збуреннями. З 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-Горєва [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 зображуваним 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. Для підтвердження цієї гіпотези необхідно проаналізувати статичну стійкість роботи генераторів одноосового та подовжньо-поперечного збудження на потужну мережу в залежності від наявності демпферних обмоток при регулюванні збудження по відхиленню кута вильоту ротора.

Мета роботи – провести аналіз впливу демпферної обмотки на ступінь демпфування взаємних коливань паралельно працюючих синхронних генераторів при регулюванні збудження по відхиленню кута вильоту ротора.

Теоретичне обґрунтування досліджень та результати роботи

Рівняння Парка-Горєва доцільно записати в осях d , q , жорстко зв'язаних з ротором. У той же час, як позитивні напрямки для струмів, потокозчеплень і напруг у контурах статора і ротора приймемо напрямки, представлені для режиму генератора на рис.1. Такий вибір напрямку осей припускає позитивні знаки проекцій струму якоря I_d та I_q у генераторному режимі при перезбудженні машини.

Рисунок 1 – Напрямки складових струмів та потокозчеплень по осям d і q .

В обраній системі координат рівняння Парка-Горєва у відносних одиницях для синхронного генератора подовжньо-поперечного збудження можуть бути записані в такому вигляді:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d}{dt}(-x_d I_d + I_{fd} + I_{rd}) + (x_q I_q - I_{fq} + I_{rq}) \omega - r_a I_d &= U_d; \\ -\frac{d}{dt}(x_q I_q - I_{fq} + I_{rq}) + (-x_d I_d + I_{fd} + I_{rd}) \omega - r_a I_q &= U_q; \\ T_{d0} \frac{d}{dt}(-k_{sfd} x_{ad} I_d + I_{fd} + k_{sfd} I_{rd}) + I_{fd} &= U_{fd}; \\ T_{q0} \frac{d}{dt}(-k_{sfq} x_{aq} I_q + I_{fq} - k_{sfq} I_{rq}) + I_{fq} &= U_{fq}; \\ T_{1d} \frac{d}{dt}(-k_{srd} x_{ad} I_d + k_{srd} I_{fd} + I_{rd}) + I_{rd} &= 0; \\ T_{1q} \frac{d}{dt}(k_{srq} x_{aq} I_q - k_{srq} I_{fq} + I_{rq}) + I_{rq} &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

де 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; ω – 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. При записі рівнянь (1) були враховані знаки проекцій, що дуже зручно, тому що дозволяє оперувати абсолютними значеннями параметрів.

Для забезпечення однакових розрахункових умов для випадку одноосового та подовжньо-поперечного збудження будемо розглядати неянополюсну конструкцію. Зміна каталожних даних у відносних одиницях знаходиться у досить вузькому діапазоні, що дозволяє нам для аналізу взяти такі усереднені значення: $r_a = 0,02$ 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
 $k_{fsd} = 0.947$; $k_{rsd} = 0.95$; $k_{rsq} = 0.974$; $T_{1d} = 93.3$ рад.; $T_{1d} = 91.1$ рад;
 - для генератора подовжньо-поперечного збудження
 $k_{fsd} = 0.947$; $k_{fsq} = 0.947$; $k_{rsd} = 0.95$; $k_{rsq} = 0.95$; $T_{1d} = 93.3$ рад.; $T_{1d} = 93.3$ 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 приймемо $T_{jr} = 1000$ 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_ω – коефіцієнт пропорційності, який визначає статизм регульовальної характеристики автоматичного регулятора частоти (для подальшого аналізу приймемо $k_\omega = 25$ в.о., що буде відповідати статизму регульовальної характеристики 4%).

Для спрощення оберемо наступні закони регулювання

- для генератора одноосового збудження

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

- 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 δ – кут вильоту ротора генератора (кут між віссю q та зображуючим вектором напруги якоря генератора); U_3 та U_{fxx} – задана напруга якоря та напруга холостого ходу генератора; k_u , k_Θ , $k_{\Theta 1}$, $k_{\Theta 2}$ – 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 проекціями зображуючого вектора напруги якоря та із частотою обертання ротора наступними рівняннями:

$$U_d = U \sin(\Theta); \quad U_q = U \cos(\Theta); \quad \partial\delta/\partial t = (\omega_r - 1). \quad (6)$$

Розглянемо режим роботи на потужну мережу ($\delta U = 0$) неявнополюсного генератора ($x_d = x_q = x_a$) при номінальному навантаженні. Для цього лінеаризуємо рівняння (1)-(6) і представимо їх в операторній формі при нульових початкових умовах (параметри усталеного режиму, в якому проводиться аналіз статичної стійкості, будемо позначати додатково буквою „н” в індексі):

- для генератора одноосового збудження

$$\left. \begin{aligned} & -\delta i_d (p x_d + r_a) + \omega_n x_q \delta i_q + p \delta i_{fd} + \delta \omega x_q l_{qn} + p \delta i_{rd} + \omega_n \delta i_{rq} - U_n \cos \Theta_n \delta \Theta = 0; \\ & \omega_n x_d \delta i_d + \delta i_q (p x_q + r_a) - \omega_n \delta i_{fd} - \delta \omega (l_{fdn} - x_d l_{dn}) - \omega_n \delta i_{rd} + p \delta i_{rq} - U_n \sin \Theta_n \delta \Theta = 0; \\ & \delta i_{fd} (T_{d0} p + 1) - \delta i_d T_{d0} k_{fsd} x_{ad} p + \delta i_{rd} T_{d0} k_{fsd} p - k_{\Theta} \delta \Theta - k_{\Theta 1} p \delta \Theta - k_{\Theta 2} p^2 \delta \Theta = 0; \\ & \delta i_{rd} (T_{1d} p + 1) - \delta i_d T_{1d} k_{rsd} x_{ad} p + \delta i_{fd} T_{1d} k_{rsd} p = 0; \\ & \delta i_{rq} (T_{1q} p + 1) + \delta i_q T_{1q} k_{rsq} x_{aq} p = 0; \\ & \delta \omega (T_j p + k_{\omega}) + l_{qn} \delta i_{fd} + l_{fdn} \delta i_q + l_{qn} \delta i_{rd} + l_{dn} \delta i_{rq} = 0; \\ & \delta \omega - \delta \Theta p = 0; \end{aligned} \right\}$$

- для генератора подовжньо-поперечного збудження в компенсованому режимі ($\Theta_n = 0$)

$$\left. \begin{aligned} & -\delta i_d (p x_d + r_a) + \omega_n x_q \delta i_q + p \delta i_{fd} - \omega_n \delta i_{fq} + \delta \omega (x_a l_{qn} - l_{fqn}) + p \delta i_{rd} + \omega_n \delta i_{rq} - U_n \delta \Theta = 0; \\ & \omega_n x_d \delta i_d + \delta i_q (p x_q + r_a) - \omega_n \delta i_{fd} - p \delta i_{fq} - \delta \omega (l_{fdn} - x_d l_{dn}) - \omega_n \delta i_{rd} + p \delta i_{rq} = 0; \\ & \delta i_{fd} (T_{d0} p + 1) - \delta i_d T_{d0} k_{fsd} x_{ad} p + \delta i_{rd} T_{d0} k_{fsd} p = 0; \\ & \delta i_{fq} (T_{q0} p + 1) - \delta i_q T_{q0} k_{fsq} x_{aq} p - \delta i_{rd} T_{q0} k_{fsq} p - k_{\Theta} \delta \Theta - k_{\Theta 1} p \delta \Theta - k_{\Theta 2} p^2 \delta \Theta = 0; \\ & \delta i_{rd} (T_{1d} p + 1) - \delta i_d T_{1d} k_{rsd} x_{ad} p + \delta i_{fd} T_{1d} k_{rsd} p = 0; \\ & \delta i_{rq} (T_{1q} p + 1) + \delta i_q T_{1q} k_{rsq} x_{aq} p - \delta i_{fd} T_{1q} k_{rsq} p = 0; \\ & \delta \omega (T_j p + k_{\omega}) + l_{qn} \delta i_{fd} + l_{fdn} \delta i_q - l_{fqn} \delta i_d - l_{dn} \delta i_{fq} + l_{qn} \delta i_{rd} + l_{dn} \delta i_{rq} = 0; \\ & \delta \omega - \delta \Theta p = 0. \end{aligned} \right\}$$

Отримані рівняння можна представити у вигляді добутку матриці стану системи А на вектор варіації режимних змінних δF :

- для генератора одноосового збудження

$$A_{po}(p) \cdot \delta F_{po} = 0;$$

$$A_{po}(p) = \begin{bmatrix} -(p x_d + r_a) & \omega_n x_q & p & p & \omega_n & x_a l_{qn} & -U_n \cos \Theta_n \\ \omega_n x_d & (p x_q + r_a) & -\omega_n & -\omega_n & p & -(l_{fdn} - x_d l_{dn}) & -U_n \sin \Theta_n \\ -T_{d0} k_{fsd} x_{ad} p & 0 & (T_{d0} p + 1) & T_{d0} k_{fsd} p & 0 & 0 & -k_{\Theta} - k_{\Theta 1} p - k_{\Theta 2} p^2 \\ -T_{1d} k_{rsd} x_{ad} p & 0 & T_{1d} k_{rsd} p & (T_{1d} p + 1) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & T_{1q} k_{rsq} x_{aq} p & 0 & 0 & (T_{1q} p + 1) & 0 & 0 \\ 0 & l_{fdn} & l_{qn} & l_{qn} & l_{dn} & (T_j p + k_{\omega}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -p \end{bmatrix}$$

$$\delta F_{po} = \text{colon}(\delta i_d, \delta i_q, \delta i_{fd}, \delta i_{rd}, \delta i_{fq}, \delta i_{rq}, \delta \omega, \delta \Theta)$$

- для генератора подовжньо-поперечного збудження в компенсованому режимі ($\Theta_n = 0$)

$$A_{ps}(p) \cdot \delta F_{ps} = 0;$$

$$A_{ps}(p) = \begin{bmatrix} -(p x_d + r_a) & \omega_n x_q & p & -\omega_n \\ \omega_n x_d & (p x_q + r_a) & -\omega_n & -p \\ -T_{d0} k_{fsd} x_{ad} p & 0 & (T_{d0} p + 1) & 0 \\ 0 & -T_{q0} k_{fsq} x_{aq} p & 0 & (T_{q0} p + 1) \\ -T_{1d} k_{rsd} x_{ad} p & 0 & T_{1d} k_{rsd} p & 0 \\ 0 & T_{1q} k_{rsq} x_{aq} p & 0 & -T_{1q} k_{rsq} p \\ -l_{fqn} & l_{fdn} & l_{qn} & -l_{dn} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} p & \omega_H & (x_a I_{qH} - I_{fdH}) & -U_H \\ -\omega_H & p & -(I_{fdH} - x_d I_{dH}) & 0 \\ T_{d0} k_{fsd} p & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -T_{q0} k_{fsq} p & 0 & -k_\Theta - k_{\Theta 1} p - k_{\Theta 2} p \\ \dots & (T_{1d} p + 1) & 0 & 0 \\ 0 & (T_{1q} p + 1) & 0 & 0 \\ I_{qH} & I_{dH} & (T_j p + k_\omega) & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -p \end{bmatrix};$$

$$\delta F_{ps} = \text{colon}(\delta i_d, \delta i_q, \delta i_{fd}, \delta i_{fq}, \delta i_{rd}, \delta i_{rq}, \delta \omega, \delta \Theta).$$

Прибираючи строку, що описує процеси у відповідній демпферній обмотці, та стовпець, що відповідає варіації струму в цій обмотці, ми отримуємо 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.

В якості розрахункового усталеного режиму 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 компенсованому 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 поперечній 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_Θ , $k_{\Theta 1}$, $k_{\Theta 2}$, розрахунку коренів характеристичного рівняння та визначення степені статичної стійкості η як найбільшої дійсної частини цих коренів. Варіюючи коефіцієнтами k_Θ (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.), отримані максимальні значення ступеня статичної стійкості:

варіант 1: при $k_\Theta = 15$ в.о., $k_{\Theta 1} = 300$ в.о., $k_{\Theta 2} = 10\,000$ в.о. маємо $\eta = -0,027$ рад⁻¹;

варіант 2: при $k_\Theta = 29$ в.о., $k_{\Theta 1} = 570$ в.о., $k_{\Theta 2} = 9\,000$ в.о. маємо $\eta = -0,055$ рад⁻¹;

варіант 3: при $k_\Theta = 2$ в.о., $k_{\Theta 1} = 0$ в.о., $k_{\Theta 2} = 9\,600$ в.о. маємо $\eta = -0,014$ рад⁻¹;

варіант 4: при $k_\Theta = 3$ в.о., $k_{\Theta 1} = 0$ в.о., $k_{\Theta 2} = 9\,200$ в.о. маємо $\eta = -0,013$ рад⁻¹.

Фактично, отриманий результат є від'ємним. Статична стійкість тим більша, чим більш від'ємним є степінь статичної стійкості. Таким чином, найбільшої стійкості паралельної роботи можна досягти при одноосьовому збудженні та наявності демпферних обмоток. Використання двоосьового збудження при визначеному законі регулювання не дозволяє збільшити демпфування взаємних малих коливань. Це пояснюється негативною дією подовжньої обмотки збудження в компенсованому режимі. Для виключення цього впливу введемо в подовжній осі позитивний зворотній зв'язок по похідній струму збудження та негативний зворотній зв'язок по похідній подовжньої складової струму якоря:

$$U_{fd} = U_{fd0} + k_u (U_3 - U) + k_1 T_{d0} \frac{di_f}{dt} - k_2 T_{d0} k_{fsd} x_{ad} \frac{di_d}{dt},$$

в цьому випадку варіація напруги збудження при роботі на мережу нескінченної потужності ($\delta U = 0$)

$$U_{fd} = k_1 T_{d0} p \delta i_f - k_2 T_{d0} k_{fsd} x_{ad} p \delta i_d.$$

При $k_1 = k_2 = 0,9$ маємо наступні результати щодо максимального значення статичної стійкості:

варіант 1: при $k_\Theta = 28$ в.о., $k_{\Theta 1} = 570$ в.о., $k_{\Theta 2} = 200$ в.о. маємо $\eta = -0,055$ рад⁻¹;

варіант 2: система нестійка;

варіант 3: при $k_\Theta = 2$ в.о., $k_{\Theta 1} = 510$ в.о., $k_{\Theta 2} = 10\,000$ в.о. маємо $\eta = -0,064$ рад⁻¹;

варіант 4: при $k_\Theta = 30$ в.о., $k_{\Theta 1} = 540$ в.о., $k_{\Theta 2} = 8\,400$ в.о. маємо $\eta = -0,069$ рад⁻¹.

Таким чином досягти кращих показників стійкості паралельної роботи на мережу за допомогою подовжньо-поперечного збудження можна, але тільки при використанні додаткових зворотних зв'язків по струмам якоря та збудження.

Висновки. 1. Введення поперечної демпферної обмотки в синхронний генератор подовжньо-поперечного збудження, що працює в скомпенсованому режимі (із нульовим кутом ротора), не дозволяє збільшити ефективність демпфування взаємних коливань при паралельній роботі генераторів. 2. Використання демпферної обмотки в синхронних генераторах одноосового збудження дозволяє в рази збільшити статичну стійкість паралельної роботи генераторів. 3. Зворотній зв'язок по куту вильоту ротора та його похідним дозволяє в рази збільшити статичну стійкість паралельної роботи синхронних генераторів. 4. При введенні додаткових зворотніх зв'язків по похідним струмів якоря та збудження генератор подовжньо-поперечного збудження дозволяє забезпечити приблизно на 20% більшу статичну стійкість роботи на потужну мережу, ніж генератор одноосового збудження.

Список використаних джерел

1. Савенко О. Є. Дослідження суднової електроенергетичної системи порома «Сйськ» / 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. 74-78.1. Новогрецький С.Н. Особенности анализа статической устойчивости электроэнергетических систем [Електронне видання] / С.Н. Новогрецький // Електронний Вісник НУК. – Миколаїв: НУК, 2010. – №2. – 5с.
3. Новогрецький С.Н. Влияние неравномерности хода первичных двигателей на колебания режимных параметров параллельно работающих скомпенсированных синхронных генераторов [Текст] / С.Н. Новогрецький // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КДПУ, 2009. – Вип. 3 / 2009 (56) частина 1. – С. 27 – 30.
4. Новогрецький С.Н. Регулирование напряжения возбуждения в скомпенсированном синхронном генераторе [Текст] / С.Н. Новогрецький С.М. // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – Кременчук: КДПУ, 2004. – Вип. 2/2004 (25). – С. 71 – 73.
5. 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
6. 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>
7. 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>
8. Новогрецький С.М. Статическая устойчивость работы синхронных генераторов автономно и на сеть бесконечной мощности [Текст] / С.М. Новогрецький // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – Кременчук: КДПУ, 2007. – Вип. 3/2007 (44) частина 2. – С. 114 – 117.

УДК 621.3

Новогрецький С.М., к.т.н., доц., Меліхов Д.С., аспірант

Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, м. Миколаїв

РОЗРАХУНОК ПОТОКУ РОЗСІЮВАННЯ В ОБМОТКОВОМУ ВІКНІ КЕРОВАНОГО ПІДМАГНІЧУВАННЯМ РЕАКТОРА

Керовані реактори використовуються в електротехнічних установках, де необхідно плавно регулювати реактивну потужність або змінювати частотні характеристики фільтрокомпенсуючих пристроїв. Реактори можуть керуватись статичними напівпровідниковими перетворювачами за рахунок регулювання кута відкриття тиристорів або шпаруватості широтно-імпульсного керування транзисторних ключів. Але з точки зору зменшення вмісту вищих гармонік в струмі реактора є доцільним використання підмагнічування окремих ділянок його магнітопроводу. Виділяють окремо два види підмагнічування: поперечне (при дії магнітного потоку

підмагнічування перпендикулярно основному потоку) та подовжнє (обидва магнітних потоки діють в одному напрямку). Поперечне підмагнічування з точки зору вмісту гармонік має кращі показники [1, 2]. Для правильного проектування та розуміння впливу електротехнічного пристрою на параметри системи, в якій він буде працювати, важливо знати розподіл магнітного потоку в окремих частинах магнітопроводу. Цей розподіл можна розрахувати за методом магнітних кіл без врахування магнітних потоків розсіювання. Але при підмагнічуванні окремих ділянок магнітопроводу збільшується їх магнітний опір, що може створити умови для виникнення значних потоків розсіювання та великих похибок електромагнітного розрахунку.

Мета роботи – визначити загальний підхід щодо формування спрощеної математичної моделі для розрахунку потоків розсіювання в обмотковому вікні керованого підмагнічуванням реактора.

Теоретичне обґрунтування досліджень та результати роботи

Візьмемо за основу трифазний керований реактор радіальної конструкції з поперечним підмагнічуванням ярма. Магнітне коло представлене на рис.1. Система симетрична, обмоткове вікно представляє собою ромб із стороною l_c . Перетин магнітопроводу має висоту h_c та ширину b_c . Між секціями технологічний повітряний зазор δ_1 , зовнішнє яро має два стикові зазори δ_2 для забезпечення роз'ємності конструкції та монтажу обмотки. Припустимо, був проведений розрахунок основного магнітного кола без врахування потоків розсіювання. На рис. 2, представлена схема заміщення однієї з трьох секцій, в якій кожна однорідна за магнітними властивостями ділянка заміщена магнітною провідністю [3-6]. В результаті розрахунку отримані потоки $\Phi_1 \dots \Phi_6$ в кожній ділянці секції. Це дозволяє розрахувати розподіл магнітного потенціалу по довжині ділянок секції:

$$\begin{aligned}\varphi_{m13}(x) &= F_c x^2 / l_c^2 - \Phi_1 / Y_{12} - \Phi_2 x / (l_c Y_{23}); \\ \varphi_{m34}(x) &= \varphi_{m13}(l_c) + F_c (l_c^2 - (l_c - x)^2) / l_c^2 - \Phi_3 x / (l_c Y_{34}); \\ \varphi_{m45}(x) &= \varphi_{m34}(l_c) - \Phi_4 / Y_{\delta 2} - \Phi_4 x / (l_c Y_{45}); \quad \varphi_{56}(x) = \varphi_{45}(l_c) - \Phi_4 x / (l_c Y_{56}); \\ \varphi_{m67}(x) &= \varphi_{56}(l_c) - \Phi_4 / Y_{\delta 2} - F_a x^2 / l_c^2 - \Phi_5 x / (l_c Y_{67}); \\ \varphi_{m71}(x) &= \varphi_{m67}(x) - F_a (l_c^2 - (l_c - x)^2) / l_c^2 - \Phi_6 x / (l_c Y_{78}) - \Phi_1 / (Y_{18}),\end{aligned}$$

де x – це відстань від точки i до розрахункової при визначенні магнітного потенціалу φ_{mij} на ділянці ij ; залежність намагнічуючих сил від відстані визначались із розуміння трикутного перетину в обмотковому вікні силових обмоток.

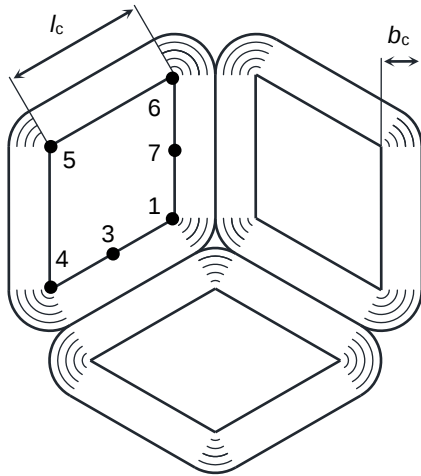


Рисунок 1 – Магнітопровід трифазного реактора радіальної конструкції

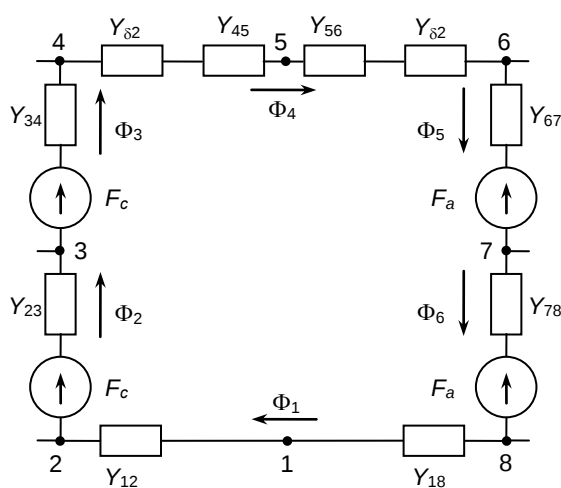


Рисунок 2 – Схема заміщення однієї з трьох секцій реактора

Розділимо обмоткове вікно на $n \times n$ однакових геометричних частин (в даному випадку ромбів). На рис. 3 представлений варіант, коли $n = 6$. Далі кожен частину замістимо схемою заміщення у вигляді чотирьохпроменевої зірки (більш доцільним має бути заміщення з'єднання чотирикутником, в якому суміжні магнітні опори відмінні та залежать від кута між суміжними сторонами обмоткового вікна, але для спрощення розуміння пропонуємо використати саме таку схему). Кожен промінь поєднує відповідною магнітною провідністю середину однієї зі сторін ромба та центральний вузол ромбу. На рис. 4 представлена схема заміщення для $n = 6$.

Як можна бачити, навіть при малому значенні n маємо досить складну схему заміщення. Але використання матричного обчислення нівелює цю складність.

Провідності, що входять в схему, легко визначаються за геометричними параметрами обмоткового вікна:

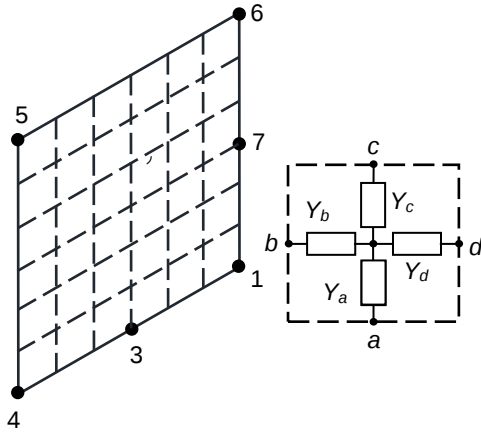


Рисунок 3 – Розділення обмоткового вікна на однакові геометричні частини

- провідність, що сполучена із ділянкою магнітопроводу, яка не підмагнічується

$$Y_1 = 2\mu_0 h_c + \frac{8\mu_0 b_c l_c}{l_c + b_c \pi n};$$

- провідність, що сполучена із ділянкою магнітопроводу, яка підмагнічується

$$Y_2 = 2\mu_0 (2b_c + h_c) + \frac{8\mu_0 b_c l_c}{l_c + b_c \pi n};$$

- провідність, що не сполучена із ділянкою магнітопроводу

$$Y_3 = 2\mu_0 (2b_c + h_c).$$

Що стосується потенціалів вхідних вузлів, використовуючи раніше отриманий розподіл для магнітного потенціалу, для $n = 6$ маємо:

$$\begin{aligned} \Phi_{m1x} &= \Phi_{m13}(l_c/12); & \Phi_{m2x} &= \Phi_{m13}(l_c/4); & \Phi_{m3x} &= \Phi_{m13}(5l_c/12); & \Phi_{m4x} &= \Phi_{m34}(l_c/12); \\ \Phi_{m5x} &= \Phi_{m34}(l_c/4); & \Phi_{m6x} &= \Phi_{m34}(5l_c/12); & \Phi_{m7x} &= \Phi_{m45}(l_c/12); & \Phi_{m8x} &= \Phi_{m45}(l_c/4); \\ \Phi_{m9x} &= \Phi_{m45}(5l_c/12); & \Phi_{m10x} &= \Phi_{m45}(7l_c/12); & \Phi_{m11x} &= \Phi_{m45}(3l_c/4); & \Phi_{m12x} &= \Phi_{m45}(11l_c/12); \\ \Phi_{m13x} &= \Phi_{m56}(l_c/12); & \Phi_{m14x} &= \Phi_{m56}(l_c/4); & \Phi_{m15x} &= \Phi_{m56}(5l_c/12); & \Phi_{m16x} &= \Phi_{m56}(7l_c/12); \\ \Phi_{m17x} &= \Phi_{m56}(3l_c/4); & \Phi_{m18x} &= \Phi_{m34}(11l_c/12) - \Phi_4/Y_{\delta 2}; & \Phi_{m19x} &= \Phi_{m67}(l_c/12); & \Phi_{m20x} &= \Phi_{m67}(l_c/4); \\ \Phi_{m21x} &= \Phi_{m67}(5l_c/12); & \Phi_{m22x} &= \Phi_{m71}(l_c/12); & \Phi_{m23x} &= \Phi_{m71}(l_c/4); & \Phi_{m24x} &= \Phi_{m71}(5l_c/12). \end{aligned}$$

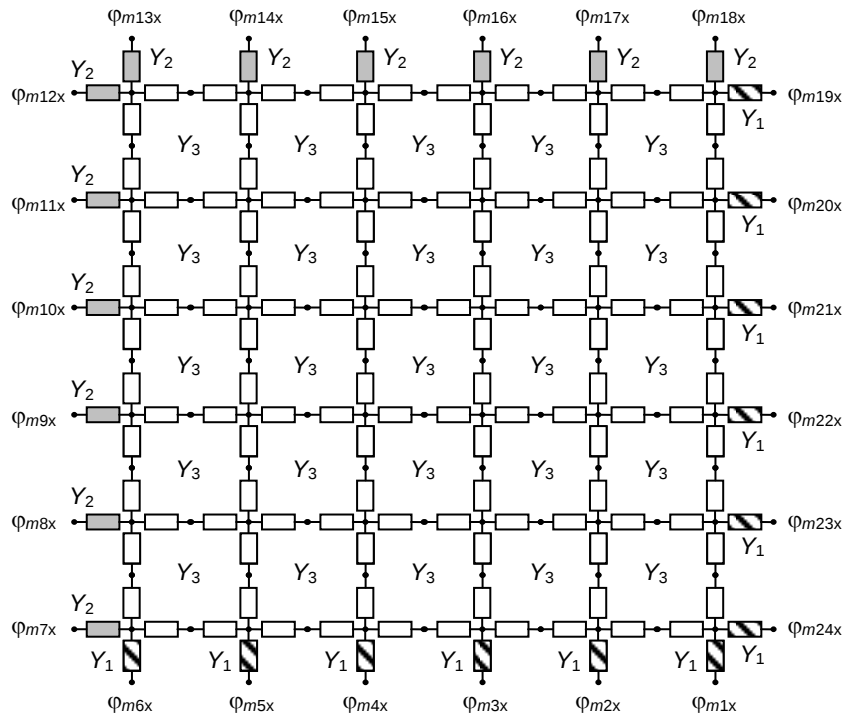


Рисунок 4 – Схема заміщення магнітного кола для обмоткового вікна при

Для подальшого аналізу спочатку будемо граф нашого магнітного кола, нумеруємо вузли та гілки, задаємо позитивним напрямом в гілках. Далі формуємо матрицю з'єднань **A**, що складається з 36 рядків (на один менший від кількості вузлів) та 84 стовпців (кількість гілок). Нумерація рядків співпадає із нумерацією вузлів, а нумерація стовпців із нумерацією гілок. Правила заповнення загальноприйняті: якщо позитивний напрям гілки k прямує до вузла n , в комірку kn матриці записуємо +1; якщо позитивний напрям гілки k прямує від вузла n , в комірку kn матриці записуємо -1; якщо між гілкою k та вузлом n не має безпосереднього поєднання, в комірку kn матриці записуємо 0. Після того формуємо діагональну матрицю провідностей **Y**, розмірністю 84x84 (за кількістю гілок). Усім коміркам, для яких номер рядка не співпадає із номером стовпчика, присвоюємо значення 0. Для

комірок із номером kk присвоюємо значення провідності гілки k . Останнім формуємо стовпець джерел енергії F , в якому кількість строк дорівнює кількості гілок, а в комірку за номером k , що відповідає зовнішній гілці із провідностями Y_1 або Y_2 , розташовується значення відповідного магнітного потенціалу із яким ця гілка сполучена: $-\varphi_{mkx}$, якщо напрям гілки від вузла із відомим потенціалом, та φ_{mkx} , якщо напрям протилежний. Іншим коміркам, які відповідають гілкам із провідностями Y_3 , присвоюється нуль. Після формування відповідних матриць можна знайти вектор магнітних потенціалів всіх вузлів відносно базисного нульового вузла, який на рис.4 не показаний (передбачається, що потенціали φ_{mkx} формуються відповідними MPC із загальною нульовою точкою):

$$U = -(AYA^{-1})^{-1}AYF.$$

Після визначення магнітних потенціалів розраховуємо магнітний потік в гілці, як добуток провідності цієї гілки на різницю потенціалів вузлів, які поєднує ця гілка. Для гілки k , що поєднує вузли i та j :

$$\Phi_k = (U_i - U_j)Y_k.$$

Такий підхід дозволяє отримати данні щодо потоків розсіювання та уточнити математичну модель розподілу магнітного потоку в головному магнітному колі за рахунок введення у відповідні вузли джерел магнітних потоків розсіювання. Це спрощує розрахунок магнітного кола загалом, так як задача розбивається дві більш прості.

Висновки. 1. Розрахунок потоків розсіювання при підмагнічуванні окремих ділянок магнітопроводу є важливим для моделювання процесів в реакторі та оптимізаційних розрахунків. 2. При формуванні спрощеної схеми заміщення обмоткове вікно ділиться на певну кількість однакових геометричних ділянок, кожна ділянка заміщується чотирьохпроменевою схемою з'єднання провідностей. Схема розраховується матричним методом за відомими на вільних гілках магнітними потенціалами, які були отримані з розрахунку основного магнітного кола. 3. Результати розрахунків можуть бути використані при уточненні розрахунку основного магнітного кола за рахунок введення у відповідні вузли джерел магнітних потоків розсіювання.

Список використаних джерел

1. Новогорецький С.Н. Гармонический состав тока трехфазного при поперечном подмагничивании ярма. / С.Н. Новогорецький, В.И. Подымака, А.А. Прудников // Вчені записки Таврійського Національного університету імені В.І. Вернадського. – Київ: ТНУ, 2018. – Том 29 (68), № 3, Частина 1.– С. 48-53.
2. Патент України на корисну модель № 120831. Електромагнітна система з регулюванням підмагнічування магнітопроводу / Ставинський А.А., Новогорецький С.М., Прудников А.О. – заяв. 04.04.2017; опубл. 27.11.2017; Бюл. №22. – 5 с.
3. Міліх В.І. Розрахунки магнітних полів в електротехнічних пристроях: навчальний посібник / В.І. Міліх. Харків: ФОП Панов А.М., 2021. – 136 с.
4. Карпов Ю.О., Ведміцький Ю.Г., Кухарчук В.В. Теоретичні основи електротехніки. Електромагнітне поле: Підручник. – Херсон: ОЛДІ-ПЛЮС, 2014. – 407 с.
5. Міліх В.І. Електромагнітні поля, параметри та процеси в електротехнічних пристроях: підруч. для студентів і аспірантів електротехн. профілю / В.І. Міліх; М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т". – Харків : НТУ "ХПІ", 2020. – 392 с.
6. Маляр В.С. Теоретичні основи електротехніки. Електричні кола: навч. посібник / В.С. Маляр. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2012. – 312 с.

УДК 621.3.078

Пальчиков О.О., к.т.н.

Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, м. Миколаїв

МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ПОВОРОТУ КОЛОНИ РОБОТА З РЕГУЛЯТОРАМИ ШВИДКОСТІ І ПОЛОЖЕННЯ НА БАЗІ СИНХРОННОГО ДВИГУНА

Зараз існують готові технічні рішення на основі мікроконтролерів для керування синхронним двигуном зі збудженням від постійних магнітів (СДЗПМ), наприклад [1-3]. На основі огляду публікацій [4-7] можна стверджувати, що сучасною тенденцією розвитку систем автоматичного керування СДЗПМ є бездатчикове полеорієнтоване керування. Прикладному застосуванню електропривода з СДЗПМ присвячена публікація [8]. Отже, автоматизовані електроприводи з СДЗПМ все більше набувають популярності і розширюють свою область застосування, витісняючи привід на основі асинхронних двигунів і колекторних двигунів постійного струму.

Ціль роботи – налаштувати позиційний електропривод на базі СДЗПМ для повороту колони робота з контурами кутових переміщення і швидкості, а також розрахувати перехідні процеси за кутовим переміщенням, кутовою швидкістю і моментом електропривода механізму обертання колони робота.

Розроблена структурна схема електропривода з контурами кутових переміщення і швидкості представлена на рис. 1. Блок електропривода складається з рівнянь інвертора напруги, СДЗПМ, блоку перетворення струму якоря з вісей d і q у вісі A, B, C , механічного навантаження і редуктора.

Рівняння динаміки СДЗПМ з синусоїдальною зворотною хвилею електрорушійної сили в обмотках будемо розглядати у неявнополюсному наближенні, які у вісях d і q записуються:

$$d(i_d)/dt = ((v_d - R \cdot i_d)/L) + p_n \cdot i_q \cdot \omega;$$

$$d(i_q)/dt = ((v_q - R \cdot i_q)/L) - (\Psi \cdot p_n \cdot \omega/L) - p_n \cdot i_d \cdot \omega;$$

$$M_{em} = 1,5 \cdot p_n \cdot \Psi \cdot i_q;$$

$$J_{\Sigma}(d\omega/dt) = M_{em} - M_{BT} - M_{оп} - M_k,$$

де i_d і i_q – проекції амплітуди фазного струму обмотки якоря на вісі d і q ; v_d і v_q – проекції амплітуди фазної напруги обмотки якоря на вісі d і q ; L і R – індуктивність і опір фази обмотки статора; ω – кутова швидкість ротора; p_n – кількість пар полюсів; Ψ – амплітуда потокозчеплення, що індукується одним полюсом ротора в фазах статора; J_{Σ} – сумарний момент інерції колони робота; M_{em} , M_{BT} , $M_{оп}$, M_k – електромагнітний момент без врахування магнітних втрат в якорі і момент механічних і магнітних втрат двигуна, а також приведені моменти опору обертання колони і сил Коріоліса відповідно.

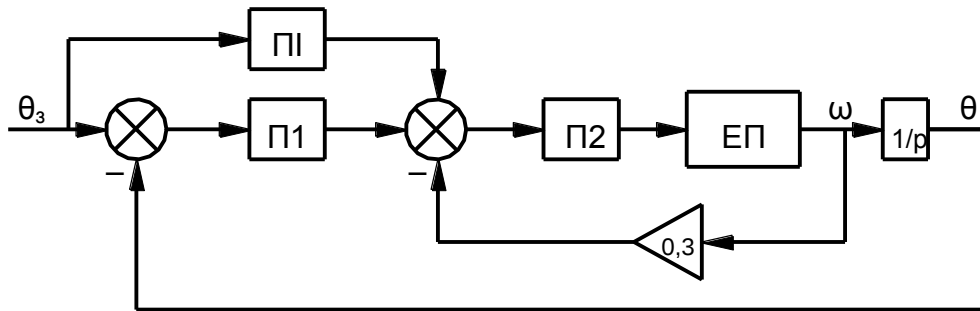


Рисунок 1 – Структурна схема позиційного електропривода з підпорядкованим контуром швидкості

У моделі інвертора реальні фізичні процеси у його напівпровідникових елементах замінені двома джерелами синусоїдальної напруги, які керуються на основі співставлення заданих і поточних значень струмів обмоток якоря СДЗПМ. Втрати у редукторі нехтуються.

Для моделювання, налаштування регуляторів і зворотних зв'язків електропривода повороту колони при одночасному збільшенні вильоту руки робота, приймалось, що сумарний момент інерції системи незмінний і становить $J_{\Sigma} = 2,469 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$; приведений момент опору обертання колони становить $M_{оп} = 0,2 \text{ Н} \cdot \text{м}$; параметри моделі СДЗПМ типу JPM100L30-3 – $R = 1 \text{ Ом}$, $L = 0,012 \text{ Гн}$, $\Psi = 0,3081 \text{ В} \cdot \text{с}$, $p_n = 3$, $U_Y = 380 \text{ В}$; момент механічних і магнітних втрат двигуна – постійний за цикл і відповідає бажаній кутовій швидкості механізму обертання з врахуванням передаточного відношення редуктора – $M_{BT} = 0,254 \text{ Н} \cdot \text{м}$; передаточне відношення редуктора – 45; технічні характеристики робота Seiko RT 3200: маса навантаження – 10 кг, швидкість горизонтального переміщення навантаження – 1 м/с, межі горизонтального переміщення вантажу – 0,05...0,355 м; максимальне кутове переміщення – 300°; максимальна кутова швидкість повороту колони – 200 °/с.

Регулятори пропонується організувати таким чином, як представлено на рис. 1. Вводяться два жорсткі від'ємні зворотні зв'язки за положенням і за швидкістю. Зворотній зв'язок за положенням – одиничний, за швидкістю – 0,3. Підібрані наступні передаточні функції регуляторів:

$$W_{PI} = 1 + 1/p;$$

$$W_{P1} = 70;$$

$$W_{P2} = 10.$$

Вказані регулятори мають насичення, тобто їх вихідні сигнали мають межі -30...+30. Основні вимоги до електропривода повороту колони робота, які були враховані при налаштуванні регуляторів, – мінімальність похибки за кутовим положенням колони, мінімальність коливань перехідного процесу за кутовим переміщенням, кутова швидкість колони за виключенням режимів розгону і гальмування має бути максимальною і не перевищувати 200°/с.

Результати моделювання динаміки електропривода з СДЗПМ повороту колони робота при одночасному горизонтальному видовженні його руки на основі розробленої моделі в *Matlab* наведені на рис. 2-4. На цих рисунках всі величини приведені до колони робота.

В цьому дослідженні не досліджувався вплив насичення регуляторів на динаміку електропривода. Загалом при варіюванні параметрів регуляторів спостерігався вплив на перехідні процеси у електроприводі лише в областях набору Коріолісового моменту і гальмування електропривода при наближенні до бажаного кутового переміщення. Була також проведена перевірка СДЗПМ при роботі його у складі електропривода за методом еквівалентного моменту за цикл роботи, який складає 1,55 с. СДЗПМ цю перевірку проходить, так як еквівалентний момент складає 8,218 Н·м. В цілому розроблений електропривод придатний для застосування в роботі Seiko RT 3200.

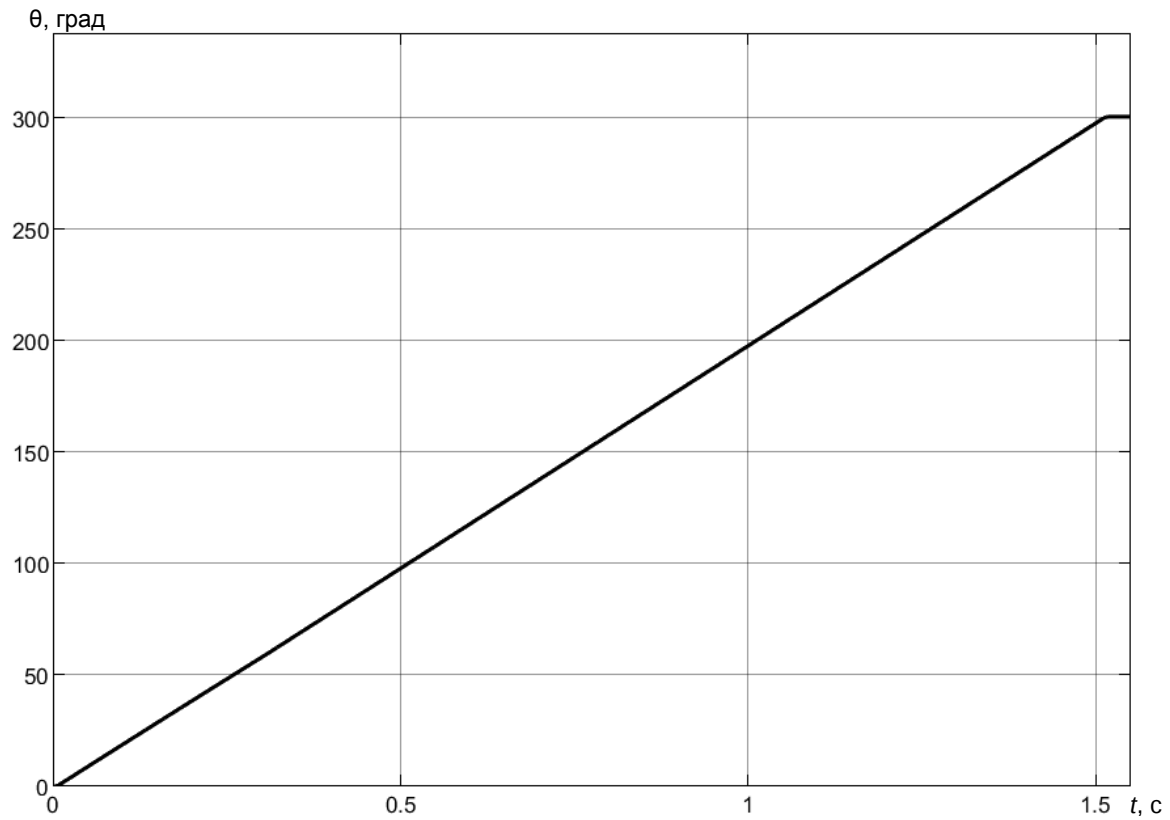


Рисунок 2 – Залежність кутового переміщення колони від часу при відпрацюванні кута повороту 300°

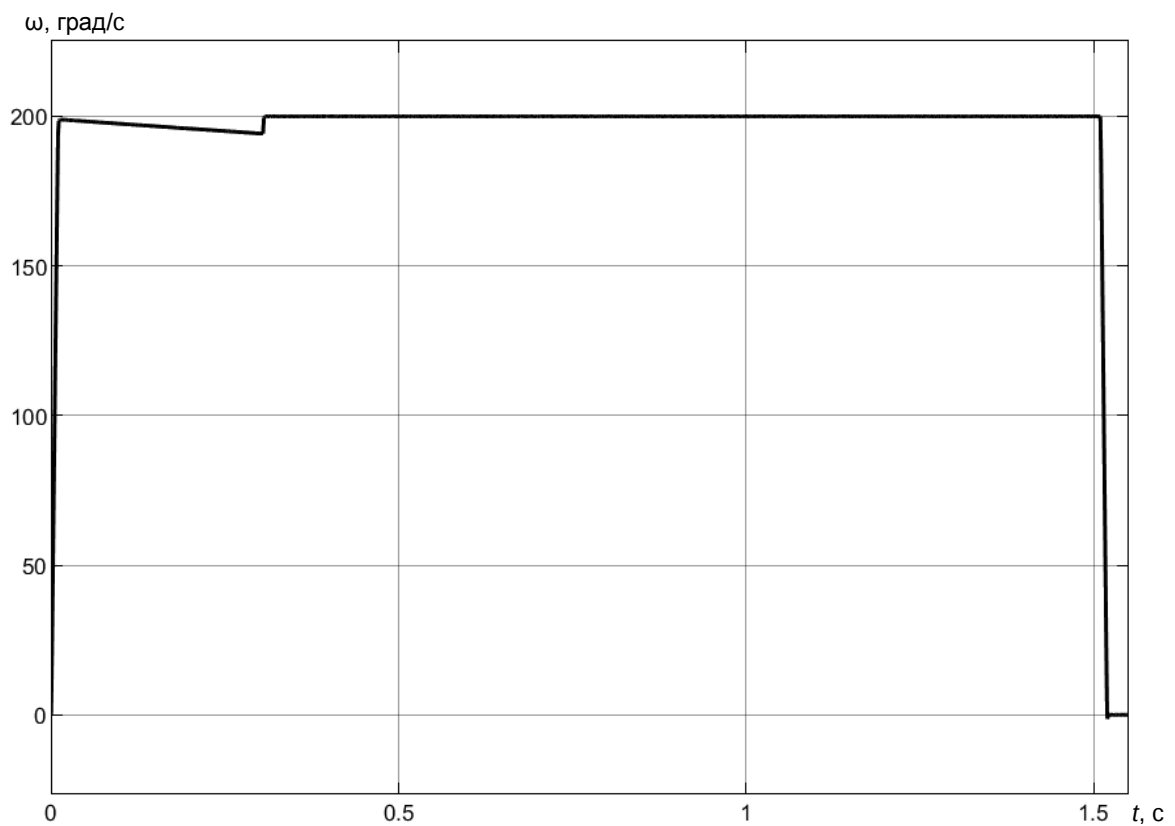


Рисунок 3 – Залежність кутової швидкості електропривода за період переміщення колони на кут 300°

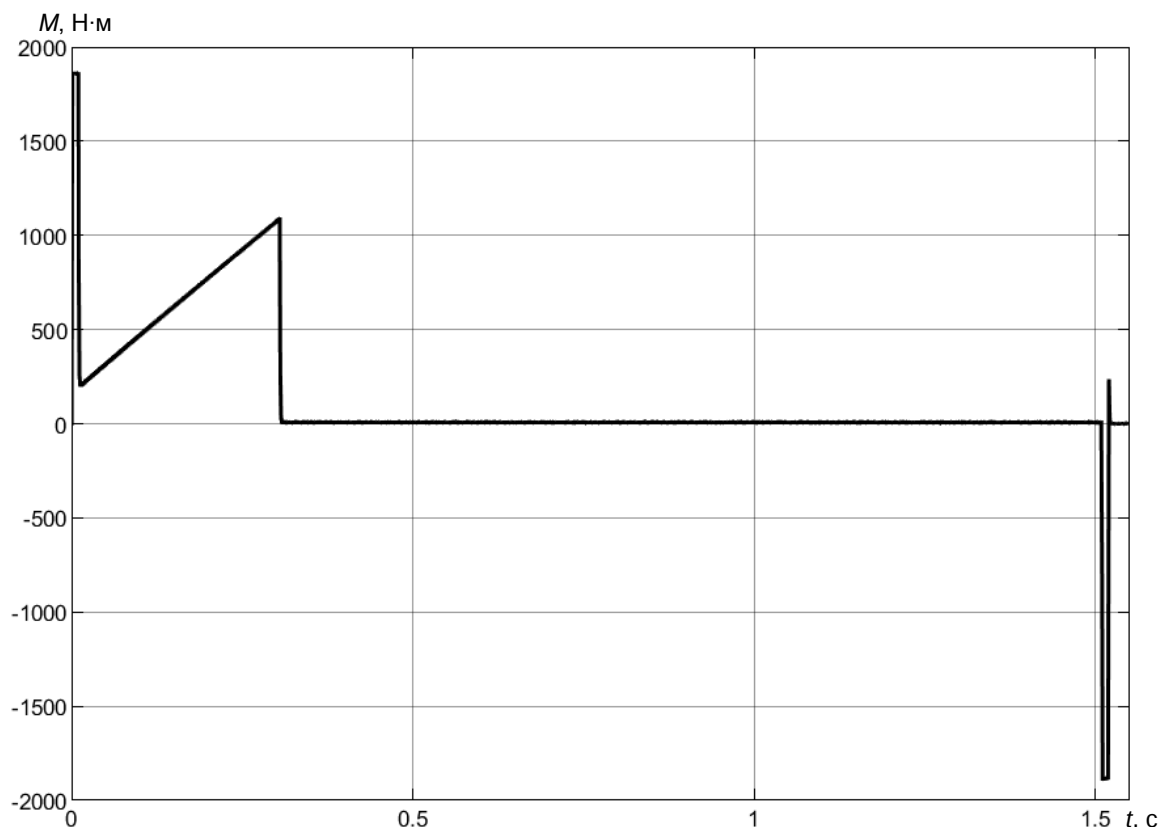


Рисунок 4 – Залежність моменту електропривода за період переміщення колони на кут 300°

Висновки. Розроблена модель позиційного електропривода на базі СДЗПМ для повороту колони робота з контурами кутових переміщення і швидкості та з наближеним врахуванням втрат на перемагнічування осердя та механічних втрат, на основі якої налаштовано систему регуляторів і зворотних зв'язків так, щоб характеристики привода відповідали технічним вимогам, які висуваються для аналогічної підсистеми робота *Seiko RT 3200*. Вказана компоновка регуляторів і зворотних зв'язків може бути застосована для аналогічних електроприводів кутового переміщення. В якості подальших досліджень позиційного електропривода на базі СДЗПМ планується ввести ще регулятор струму на додаток до регуляторів кутового положення і швидкості.

Список використаних джерел

1. Ramamoorthy R.T., Larimore B., Bhardwaj M. Sensorless field oriented control of 3-phase permanent magnet synchronous motors using TMS320F2837x. – USA, Texas Instruments Incorporated, 2021. – 40 p. <https://www.ti.com/lit/an/sprabz0a/sprabz0a.pdf?ts=1628093281487>
2. Microchip AN4398. Sensorless field oriented control for a permanent magnet synchronous motor using sliding mode observer. – Microchip Technology Inc. and its subsidiaries, DS00004398B, 2024. – 27 p.
3. Microchip AN2757. Sensorless (Encoder-Based) field oriented control of three-phase permanent magnet synchronous (RMSM). – Microchip Technology Inc., DS00002757A, 2018. – 27 p.
4. Ramírez-Villalobos R., Coria L.N., Valle P.A., Aldrete-Maldonado C. Sensorless control of permanent magnet synchronous motor drives with rotor position offset estimation via extended state observer. – Mathematics, 2025, 13, 899. <https://doi.org/10.3390/math13060899>
5. Abdelnaby G.F., Dakrory T.A., Arafa S.H., Ramdan S.G. Sensorless field oriented control of permanent magnet synchronous motor. – International Journal of Current Engineering and Technology, 2015, Vol. 5. – 10 p. <https://www.researchgate.net/publication/275651226>
6. Lee J., Hong J., Nam K., Ortega R., Praly L. Sensorless control of surface-mount permanent-magnet synchronous motors based on a nonlinear observer. – IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, Vol. 25 (2). – pp. 290-297. DOI: 10.1109/TPEL.2009.2025276
7. Lawan M.B., Tijjani I., Mustapha M., Sarki M.A. Sensorless position control and speed estimation techniques of permanent magnet synchronous motors. – Jurnal Pengabdian dan Pemberdayaan Masyarakat Indonesia, 2023, Vol. 3. – pp. 197-205. <https://jppmi.ptti.web.id/index.php/jppmi/>
8. Tuna N., Bilgin O. Design and implementation of permanent magnet synchronous motor speed control for variable flowrate Moto-Pump application. – International Journal of Computer Science and Electronics Engineering (IJCSEE), 2016, Vol. 4. – P. 104-107. <https://journalsweb.org/siteadmin/upload/ER0816111.pdf>

СЕКЦІЯ 3. МОРСЬКЕ ПРИЛАДОБУДУВАННЯ. АВТОМАТИКА, ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ І ПРИСТРОЇ

УДК 681.51:004.89

Грудініна Г.С., к.т.н.

Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, м. Миколаїв

ШТУЧНИЙ ІНТЕЛЕКТ В СУДНОВИХ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМАХ

Застосування штучного інтелекту для підвищення автоматизації процесів керування судновим електроприводом є актуальним питанням, яке набуває стрімкого розвитку.

Основними автоматизованими системами судна є, рис.1.:

- Система керування головним рушієм. Тип приводу – електропривод з частотним перетворювачем (VFD).
- Системи швартування (лебідки, шпилі). Тип приводу – реверсивний асинхронний двигун з гальмівною системою.
- Системи вентиляції трюмів і машинних відділень. Тип приводу – електродвигуни вентиляторів із автоматичним запуском та зупинкою за показниками датчиків (температура, газ).
- Стернові машини. Тип приводу – електричні або гідроелектричні механізми.
- Протипожежні системи. Тип приводу – електроприводи для запуску насосів, вентиляції, клапанів.



Рисунок 1 – Системи автоматизованого суднового електроприводу

Роботу кожної з перелічених систем можна оптимізувати у напрямку енергоефективності, безпеки судноплавства та екологічності, застосувавши ШІ. Розглянемо основні суднові автоматизовані системи, в яких активно застосовуються інтелектуальні засоби керування.

Якірні шпилі та швартові лебідки. ШІ застосовується для прогнозування натягу тросів або ланцюга залежно від погодних умов, течій, маневрування. В системі керування ШІ оптимізує момент зупинки/гальмування, щоб уникнути ривків і зношення механіки. Проведення самодіагностики – виявлення аномалій у поведінці механізмів, попередження оператора про ризики.

Вентиляція трюмів і машинного відділення. ШІ аналізує температуру, вологість, наявність газів і навантаження, щоб заздалегідь активувати вентиляцію. Застосовується автоматичне регулювання роботи вентиляторів так, щоб підтримувати мінімально необхідні параметри при найнижчому споживанні енергії. За даними сенсорів ШІ ідентифікує зміну режимів, що свідчить про зношення двигуна або забруднення повітряних каналів.

Протипожежні системи. Інтелектуальне виявлення пожежі за допомогою використання моделей комп'ютерного зору або тепловізійних даних для точного розпізнавання реальних загорань. ШІ вибирає найефективнішу комбінацію дій: активація вентиляції, запуск конкретного насоса, закриття клапанів. Система моделює поширення диму чи вогню і керує приводами відповідно до прогнозу.

Кранове обладнання (вантажні судна). ШІ аналізує положення контейнерів або вантажів і автоматично позиціонує кран. Електропривод під контролем ШІ плавно регулює швидкість/потужність в залежності від ваги та інерції вантажу. Система підвищує продуктивність роботи обладнання використавши аналіз часу завантаження/розвантаження, виявлення «вузьких місць» у процесі.

Баластна система. ШІ розраховує оптимальне заповнення баластних танків для стабілізації судна в режимі реального часу. На основі аналізу хвилювання, вітру й осадки судна – оптимізує розподіл баласту. Виявляє витоки або помилки у датчиках за рахунок аналізу трендів зміни рівнів рідини в танках.

Метою роботи є обґрунтування необхідності застосування ШІ в суднових автоматизованих системах.

На рисунку 2 представлено переваги, щодо застосування ШІ суднових автоматизованих системах.



Рисунок 2 – Переваги застосування ШІ суднових автоматизованих системах

Розглянемо на прикладі застосування ШІ при автоматичному керуванні якорною системою. Дана система призначена для забезпечення стабільності та безпеки стоянки судна навіть у складних умовах. З цією метою система проводить інтелектуальний вибір точки постановки на якор, використовуючи супутникові знімки, морські карти та батиметричні дані. Модель ШІ оцінює тип морського дна (пісок, мул, скеля), глибину в точці постановки на якор, прогнозовані умови вітру і течії, рух інших суден поблизу. Виходячи з цього, система пропонує або автоматично визначає безпечну точку постановки на якор. Наступним кроком система виконує розрахунок оптимальної довжини якорного ланцюга. ШІ-модуль враховує тип якорного пристрою (тип якоря, маса, зчеплення з дном), тип судна (водотоннажність, осадка, інерційні характеристики) та формує рекомендації або команди для подачі потрібної довжини ланцюга. Під час безпосередньо стоянки автоматично виконується динамічне регулювання довжини якорного ланцюга в реальному часі. Датчики натягу і положення (інклінометри) моніторять стан якорного ланцюга. У разі зміни погоди або дрейфу система автоматично подає додатковий ланцюг або вибирає його, якщо судно повертається ближче до центра якорної стоянки. Це зменшує навантаження на якорні механізми і корпус судна. При цьому, система проводить контроль за зчепленням якоря з дном (anchor holding monitoring). Використання акустичних гідролокаторів або сенсорів на якорному ланцюгу для оцінки чи якор утримує судно, чи є «ковзання» (dragging). ШІ аналізує ці дані разом із позицією судна (GPS) та курсом, і у випадку небезпеки дає попередження екіпажу або активує автоматичне реагування.

Використання штучного інтелекту (ШІ) у суднових якорно-швартових системах зараз активно розвивається. Про що свідчать роботи присвячені цій темі. У статті [1] автори описують модель яка використовує технології машинного навчання для ефективного визначення позицій суден на якорі на основі даних AIS. Дослідження [2] демонструє, що алгоритми Traversal та Монте-Карло ефективно покращують точність вибору позиції для постановки на якор судна, що сприяє підвищенню безпеки та ефективності операцій. Автори статті [3] обговорюють використання штучного інтелекту та цифрових методів для моніторингу стану корпусу судна та покращення операцій з обробки якорів. Компанія PopEye Labs створила першу в світі систему моніторингу якоря для комерційних суден, яка автоматизує спостереження за якорним станом за допомогою сучасного комп'ютерного зору [4]. Стаття [5] досліджує застосування систем штучного інтелекту для виявлення морських якорних зон, використовуючи покращений алгоритм YOLOv3. У статті [6] детально проаналізовано перспективи застосування технологій глибокого навчання в галузі морської навігації. Показано, що глибоке навчання дозволяє автоматизувати та значно підвищити якість таких процесів, як розпізнавання та класифікація суден, виявлення перешкод на шляху руху судна, моніторинг та аналіз даних з бортових сенсорів, прогнозування аварійних ситуацій, розробка систем доповненої реальності для поліпшення навігації, створення віртуальних тренажерів, точне прогнозування погодних умов, автоматизоване керування рухом судна. Також, досить ефективно ШІ застосовується в системах керування безпілотними надводними суднами та підводними апаратами [7].

Висновки. В роботі представлено пропозиції, щодо застосування штучного інтелекту в основних суднових автоматизованих системах. Штучний інтелект може виконувати роль регуляторів на базі нейронної мережі чи

нечіткої логіки, або системи аналізу, збору та обробки інформації, необхідної для прийняття рішення. В роботі наведено переваги застосування ШІ в суднових автоматизованих системах, серед них: підвищення безпеки судноплавства, підвищення енергоефективності, зменшення впливу людського фактору, адаптивне керування в складних умовах, прогнозування технічного обслуговування. Для кожної з систем, показаних на рис. 1, запропоновано можливі завдання для ШІ, які можуть стати темою подальших досліджень.

Список використаних джерел

1. Liu, B., Gong, M., Wu, X., & Liu, X. (2021). A comprehensive model of vessel anchoring pressure based on machine learning to support the sustainable management of the marine environments of coastal cities. *Sustainable Cities and Society*, 72, 103011. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103011>
2. Zhou, M., Cao, L., Liu, J., Zhang, Z., Liang, Z., Cui, Z., Zhang, X., Li, J., & Li, X. (2024). Research on intelligent three-dimensional anchor position detection method for ships utilizing Traversal and Monte Carlo algorithms. *Frontiers in Marine Science*, 11, 1471328. <https://doi.org/10.3389/fmars.2024.1471328>
3. Nitonye, S., Adumene, S., & Theophilus-Johnson, K. (2025). Digitalization of Anchor Handling Tug Supply Vessels: Enhancing Efficiency and Safety in Offshore Operations. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 147(3), 030801. <https://doi.org/10.1115/1.4065775>
4. Benjamin Abt, Jacob Bendell, Mario Ferre, Nicholas Anderson, & Orestis Skoutellas. (2023) The first step towards auto-anchoring for commercial vessels. PopEye Labs. Отримано з: https://fisher.wharton.upenn.edu/wp-content/uploads/2023/06/PopEye.pdf?utm_source=chatgpt.com
5. Cao, L., Wang, X., Zhang, W., Gao, L., Xie, S., & Liu, Z. (2022). Research on Intelligent Detection Algorithm of the Single Anchored Mooring Area for Maritime Autonomous Surface Ships. *Applied Sciences*, 12(12), 6009. <https://doi.org/10.3390/app12126009>
6. Голюков, В. В., & Сінюта, К. О. (2024). Глибоке навчання у контексті штучного інтелекту в морській навігації: Перспективи розвитку. *Водний транспорт*, 104–111.
7. Бурунін, А.П., Грудініна, Г.С. (2024). Дослідження ефективності системи керування малорозмірним безкіпажним надводним судном в умовах дії зовнішніх збурень. *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова*. НУК, № 4 (497), С. 131-140. DOI [https://doi.org/10.15589/znp2024.4\(497\).19](https://doi.org/10.15589/znp2024.4(497).19)

УДК 004.77

Прищепов Є. О., Грешнов А. Ю., доцент

Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, м. Миколаїв

ПРИСТРІЙ ДЛЯ ПРИЙОМУ ТА ВІДТВОРЕННЯ ПОТОКОВИХ АУДІОДАНИХ

У сучасному інформаційному суспільстві стрімко зростає попит на пристрої, здатні здійснювати прийом та відтворення поточних мультимедійних даних, які передаються за допомогою мережі Інтернет. Якщо раніше для прослуховування музики або радіо використовувалися виключно аналогові приймачі з обмеженим функціоналом, то нині значна частина аудіоданих споживається через мережу Інтернет у форматі потокового мовлення. Це відкриває нові можливості, зокрема доступ до тисяч Інтернет-радіостанцій з усього світу, прослуховування тематичних подкастів тощо [1].

Внаслідок цього сформувалося таке поняття, як «Інтернет-радіо», яке визначає технологію передачі поточних аудіоданих через мережу Інтернет. В основі цієї технології лежать такі елементи [2]:

1. Станція – генерує аудіодані (або із списку звукових файлів, або прямим оцифруванням з аудіо-карти, або копіюючи існуючий в мережі потік) і направляє його серверу;
2. Сервер (повторювач потоку) – приймає аудіодані від станції і перенаправляє його копії усім підключеним до сервера клієнтам;
3. Клієнт – приймає аудіодані від сервера і перетворює його в аудіосигнал, який і чує слухач Інтернет-радіостанції.

Окрім потоку звукових даних зазвичай передаються також текстові дані, щоб клієнт міг відображати інформацію про станцію і про поточну композицію.

Сервери можуть відрізнятися за форматами аудіоданих, наприклад: MP3, Ogg/Vorbis, AAC, RealAudio. Аудіодані безперервно передаються послідовно (поток) по мережі Інтернет у пакетах, а потім збираються в клієнті та відтворюються.

Клієнтами можуть бути як персональні комп'ютери, смартфони, планшети, так і спеціалізовані пристрої, наприклад, Інтернет-радіоприймачі [3].

Метою роботи є розробка пристрою (Інтернет-радіоприймача) на базі мікроконтролера ESP8266 для прийому поточних аудіоданих з Інтернету, їх декодування та відтворення з використанням доступних апаратних модулів і відкритого програмного забезпечення.

Апаратна частина розробленого пристрою базується на платі WEMOS D1 R1, що сумісна з платформою Arduino Uno та базується на мікроконтролері ESP8266 [4]. Цей мікроконтролер забезпечує як обчислювальну

потужність, так і можливість бездротового з'єднання через Wi-Fi. Перевагою ESP8266 є наявність великої кількості бібліотек, активна спільнота розробників, а також енергоефективність. Для декодування аудіоданих використовується модуль на базі мікросхеми VS1053 [5], що підтримує апаратне декодування форматів MP3, AAC та інших. Він підтримує SPI-інтерфейс, що забезпечує достатню швидкість передавання даних для реального часу.

Для виведення інформації (назва, номер станції та інше) використовується графічний LCD-дисплей Nokia 5110 (на базі контролера PCD8544), який має роздільну здатність 84×48 пікселів. Його використання обумовлене як низьким енергоспоживанням, так і зручністю розміщення у компактних корпусах.

У пристрій вбудовано веб-сервер, за допомогою якого виконується завдання адрес станцій та параметри доступу до мережі Wi-Fi. Доступ до веб-сервера може здійснюватися за допомогою персонального комп'ютера, смартфона або планшета. Ці пристрої необхідні лише для налаштування. Звукове відтворення реалізовано за допомогою комп'ютерних колонок зі вбудованим підсилювачем.

Схема з'єднань представлена на рис. 1 (комп'ютерні колонки з підсилювачем не показані), а зовнішній вигляд прототипу представлений на рис. 2.

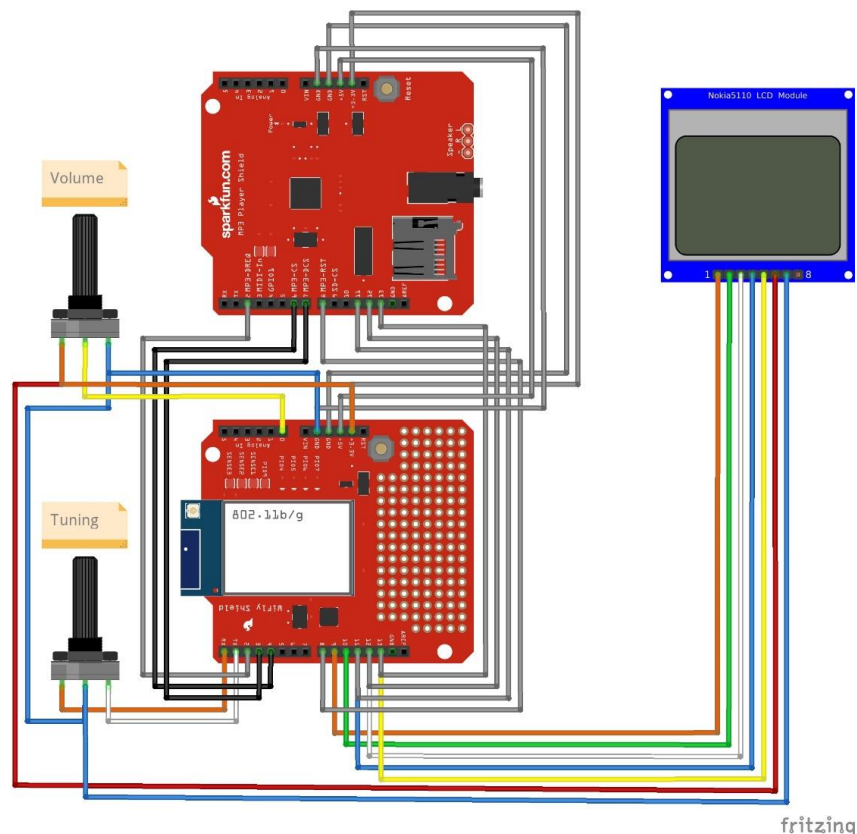


Рисунок 1 – Схема з'єднань



Рисунок 2 – Зовнішній вигляд прототипу

Висновки. У результаті виконаної роботи розроблено повнофункціональний прототип пристрою (Інтернет-радіоприймача) для прийому та відтворення поточних аудіоданих через мережу Інтернет. Пристрій відзначається простотою конструкції, мінімальною кількістю компонентів, підтримкою стандартних протоколів та відкритим програмним забезпеченням. Реалізовано виведення текстової інформації, підтримку багатьох потоків, стабільне з'єднання з Wi-Fi, збереження стану між перезапусками. У порівнянні з комерційними аналогами, пристрій є значно дешевшим, гнучкішим у налаштуванні та придатним до розширення.

Список використаних джерел

1. Listening to the radio just got easier! [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://big-radio.net/>.
2. Вікіпедія. Інтернет-радіо. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Інтернет-радіо/>.
3. US 6249810, Kiraly, Jozsef, «Method and system for implementing an internet radio device for receiving and/or transmitting media information», published June 19, 2001. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://patents.google.com/patent/US6249810>
4. ESP8266. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.espressif.com/en/products/socs/esp8266>.
5. VS1053 - Ogg Vorbis / MP3 / AAC / WMA / FLAC / MIDI Audio Codec Chip. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.vlsi.fi/en/products/vs1053.html>.

УДК 621.314.621

Клочков О.П., к.т.н., Овсянников В.М., к.т.н.

Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, м. Миколаїв

КОМУНІКАЦІЙНА СИСТЕМА «СУДНО – НЕБЕЗПЕКА ДЛЯ СУДНОПЛАВСТВА»

Вступ

Протягом останнього десятиліття інтегровані системи ходового містка (IBS) виявилися основними інформаційними системами на навігаційному містку. Вони є об'єднуючим елементом окремих засобів навігації, таких як GPS, радар, ARPA, електронна карта та інформаційна система (ECDIS), ехолот, журнал, анемометр тощо. Інформація з усіх датчиків збирається та обробляється блоком обробки IBS і може відображатися на дисплеї за допомогою окремих меню. Таким чином штурман отримує дані про розташування небезпек для судноплавства, як підводних, так і надводних, їх характеристики та рух відносно судна [1, 2]. Однак виникають наступні запитання: «Як узгоджена отримана інформація?» і «Чи цього достатньо, щоб можна було прийняти правильне рішення уникнути ситуації близького розташування?» Теоретично, координата даних майже всі засоби навігації в єдиній системі в принципі вирішували б проблему забезпечення інформацією про обстановку навколо судна. Цей факт дозволяє використати теорію інформаційного апарату при створенні інформаційної моделі для оцінки IBS із застосуванням типових для цієї теорії абстрактних понять ентропії, пропускну здатності, додаткової інформації тощо.

Клод Шеннон створив свої праці з теорії інформації на початку 20 століття. Його основною метою було встановлення кількісної оцінки можливостей комунікаційних систем. Однак завдяки своїй фундаментальності ця теорія знайшла широке застосування і в інших галузях науки і практики.

Досі не створено жодної інформаційної моделі системи «Судно-Небезпека для судноплавства», за допомогою якої можна було б оцінити ефективність IBS. Тому презентація та висновки базуватимуться на теорії інформації у застосуванні до каналів зв'язку, враховуючи особливості та потреби навігації.

Основна частина

Розглянемо принципову інформаційну схему системи «судно – небезпека для навігації». Комунікаційна система, до якої спочатку була застосована теорія інформації, загалом складається з таких елементів (рис. 1) [3]:

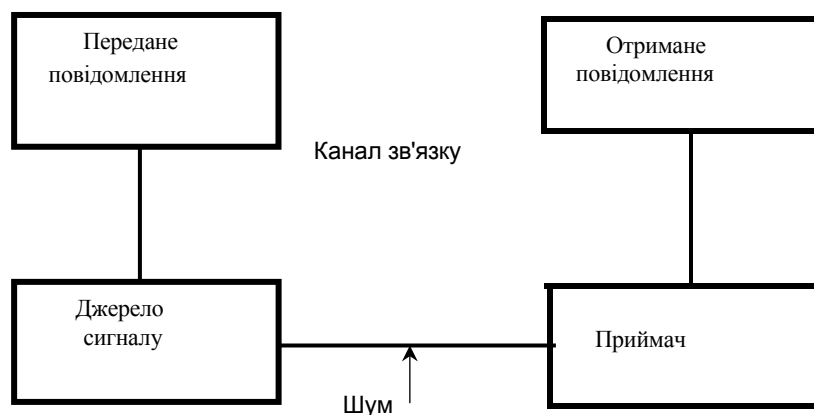


Рисунок 1 – Загальна схема зв'язку

- передане повідомлення – будь-який об'єкт (малюнки, текст, мова, зображення тощо), який можна передати;
- джерело сигналу – пристрій, який перетворює передане повідомлення в сигнал;
- канал зв'язку – здійснює передачу сигналу;
- приймач – перетворює отриманий сигнал у повідомлення;
- отримане повідомлення – передане повідомлення, яке відтворюється з певним ступенем точності.

Передача повідомлень і сигналів без втрати інформації та з максимально можливою швидкістю вимагає координації між усіма підрозділами системи. Це означає, що повинні бути виконані такі умови:

1. Процеси перетворення повідомлення в сигнал і навпаки (кодування і декодування) мають бути простою величиною в двох напрямках.
2. Кількість інформації, яка виробляється джерелом, не повинна бути меншою за кількість інформації, що міститься в переданому повідомленні.
3. Пропускна здатність каналу не повинна бути менше швидкості вхідної інформації про сигнал, виробленої джерелом.

Включимо виконання вищевказаних трьох умов із системою «небезпека для судноплавства».

Повідомлення про розташування підводних і надводних небезпек для судноплавства зазвичай носять дискретний характер. Сигнали, створювані радіолокаторами-джерелами та ехолотами, через помилку у вимірюваннях або з інших технічних причин, можуть бути дискретними або безперервними. Тому, коли в каналі є певний шум, інформація з даного повідомлення часто суперечлива і нелогічна. Для потреб цього аналізу буде вважатися, що повідомлення та сигнал є дискретними, тобто мають одну величину.

Кількість інформації, що міститься в сигналі та повідомленні, визначається їх ентропією H [4]:

$$H_i = -\log_2 P_i \quad (1)$$

де P_i – ймовірність того, що судно буде на безпечній відстані від небезпечної для судноплавства.

Отже, виконання умови 2 означало б, що ентропія джерела сигналу H_{ssiss} не повинна бути меншою за ентропію джерела повідомлення H_{mmssss} :

$$H_{ssiss} \geq H_{mmssss} \quad (2)$$

Якщо $H_{ssiss} > H_{mmssss}$, то сигнал надає більше інформації про повідомлення (об'єкт спостереження), ніж фактично вимірює конкретний навігаційний датчик. Наприклад, ARPA визначає пеленги та відстані до цілей, але дані про рух цілі, що супроводжується, також відображаються на інформаційному дисплеї IBS. Оскільки передбачалося, що повідомлення і сигнал мають дискретний характер, їх ентропія буде визначатися за формулою:

$$H = \sum p_i \cdot H_i = -\sum p_i \log_2 p_i \quad (3)$$

де H позначає рівно імовірну можливість небезпеки для судноплавства знаходитися в будь-якому районі, розташованому на безпечній відстані від судна; p – кількість цих областей.

Швидкість створення інформації R джерелом повідомлення або сигналу [5] називається ефективністю джерела. Розраховується за формулою:

$$R = I/T \quad (4)$$

де I – необхідна кількість інформації для вирішення конкретної практичної задачі; T – час отримання, отримання, обробки та передачі повідомлення.

Щоб система була здатна передавати інформацію, отриману на швидкості R , інформаційна ємність системи C повинна бути більшою, тобто $C > R$.

Теорія Клода Шеннона показує, що теоретична межа швидкості передачі інформації визначається пропускну здатністю системи. Математичний вираз C такий:

$$C = W \cdot \log_2(1 + P_{sig}/P_{noi}) \quad (5)$$

де W – ширина передачі інформації пропускну здатності системи;

P_{sig} - потужність сигналу;

P_{noi} - потужність шуму в системі

При $C > R$ теоретично можлива передача інформації з низькою ймовірністю помилок. Максимально можливий обсяг інформації, який теоретично можна безпомилково передати за час T :

$$I = C \cdot T = W \cdot T \cdot \log_2(1 + P_{sig}/P_{noi}) \quad (6)$$

Ситуація, в якій $C < R$, визначає умову (3). У разі дискретних повідомлень і сигналу, а також з урахуванням формули (5) умова виражатися:

$$H/T \leq W \cdot \log_2(1 + P_{sig}/P_{noi}) \quad (7)$$

Представлена в такому вигляді інформаційна схема системи «судно- небезпека для судноплавства» показує, що теорія інформації придатна для створення моделі, яка могла б вирішити ступінь невизначеності критичних ситуацій.

Висновки

Система має свої особливості, відмінні від тих, до яких спочатку застосовувалася теорія Шеннона. Конкретне технічне рішення частини системи приємне для дослідження навігації морських суден з інтегрованими системою ходового містка.

Перелік використаних джерел

1. Pantev N., Automation of Navigation, Varna, 2012 p.134-152 (in Bulgarian).
2. Confined waters put pressure on radar systems, Safety at Sea, December 2020, pp. 12 – 15.
3. Shannon C. Theory of Information and Cybernetics, Foreign Literature, Moscow, 1964, pp. 46 – 73 (in Russia);
4. Kullback S., Information Theory and Statistics, Chapman & Hall Ltd, London, 2005, pp. 28 - 42.
5. Kogan I. M., Theory of Information and Problems of the Closest Radiolocation, 2008, pp. 26 – 64 (in Russia).

УДК 621.865.8:531.1

Угольніков Г.Г., к.т.н., доцент, Герасін О.С.

Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, м. Миколаїв

КІНЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ РОБОТА-МАНІПУЛЯТОРА У РУХЛИВІЙ ПІДВІСНІЙ СИСТЕМІ

Кабельні роботи-маніпулятори, що належать до паралельних систем, мають значний потенціал у робототехніці завдяки конструкції з гнучкими тросами замість жорстких ланок [1]. Вони ефективно застосовуються у сферах будівництва, логістики та промисловості, забезпечуючи велику робочу зону, високу вантажопідйомність і здатність працювати на складному рельєфі.

Разом з тим, їх використання пов'язане з технічними труднощами — необхідно постійно підтримувати натяг кабелів і забезпечувати точне положення платформи, особливо у нерівних умовах.

Подолання цих викликів потребує створення математичних і імітаційних моделей елементів робота та його системи керування, що дозволяє на етапі проєктування покращити як конструкцію, так і алгоритми керування.

Метою роботи є розробка кінематичної моделі робота-маніпулятора у рухливій підвісній системі.

Конструкція підвісного робота-маніпулятора

Типова схема підвісного робота-маніпулятора складається з рухомої платформи, що з'єднана з базовою рамою за допомогою кабелів (рис. 1). Привідні двигуни встановлені на жорсткій рамі та приводять у рух лебідки. Кабель, намотаний на ці лебідки, спрямовується через вихідні точки з блоку-роликів, які розташовані на рамі, до точок кріплення на рухомій платформі. Змінюючи довжину кабелів, можна досягти бажаного положення та орієнтації рухомої платформи [2].

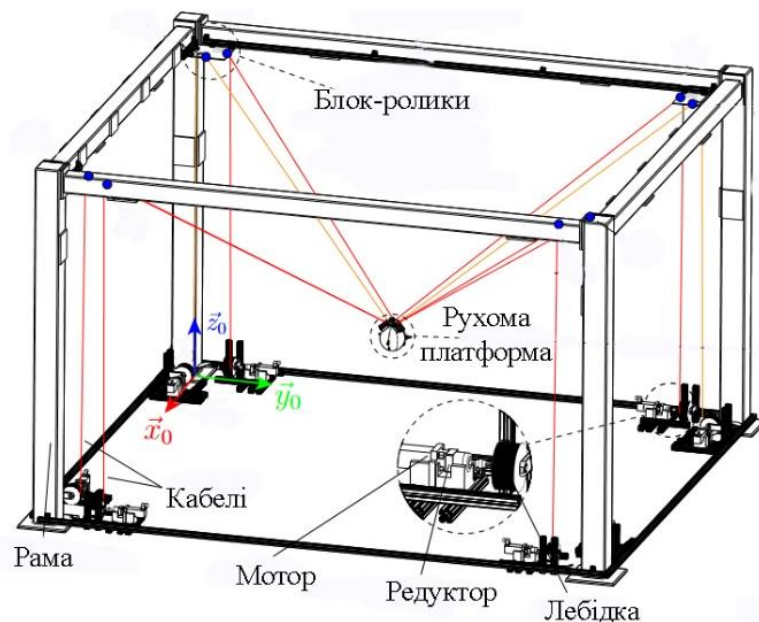


Рисунок 1 - Типова схема робота на підвісній системі

Основний принцип роботи кабельного робота полягає в тому, що рухома платформа переміщується двигунами-лебідками через кабелі, які змінюють довжину і підтримують натяг. Необхідною умовою для роботи є те, що кабелі завжди повинні підтримувати натяг, оскільки кабелі можуть лише тягнути, а не штовхати [3].

Кінематика кабельних роботів

Одним із перших завдань при керуванні підвісним роботом є розв'язання задачі оберненої кінематики положення [4,5]. Вона полягає у визначенні необхідних довжин кабелів для досягнення заданого положення рухомої платформи (рис. 2). Для цього використовується наступне рівняння:

$$L_i = \sqrt{(X_{Bi} - X_{Ai})^2 + (Y_{Bi} - Y_{Ai})^2 + (Z_{Bi} - Z_{Ai})^2}, \quad (1)$$

де L_i – довжина i -го кабелю, $i = 1..N$, N – кількість кабелів; (X_{Ai}, Y_{Ai}, Z_{Ai}) – координати кріплення на рамі; (X_{Bi}, Y_{Bi}, Z_{Bi}) – координати кріплення на рухомій платформі.

На основі рівняння (1) розроблена програма оберненої кінематики у MatLab для розрахунку довжин кабелів і візуалізації їх у 3Д-виді для підвісного робота на 8 кабелях (рис. 3).

Реалізована програма дає змогу вільно задавати положення опор, розміри рухомої платформи та координати її кінцевого положення. Візуалізація підтвердила, що раму робота можна розміщувати на нерівних поверхнях без потреби у симетрії — достатньо знати точні координати точок кріплення. Це дозволяє ефективно використовувати такі маніпулятори у складних умовах рельєфу — на гірських схилах, полях чи водних об'єктах, що є їх суттєвою перевагою.

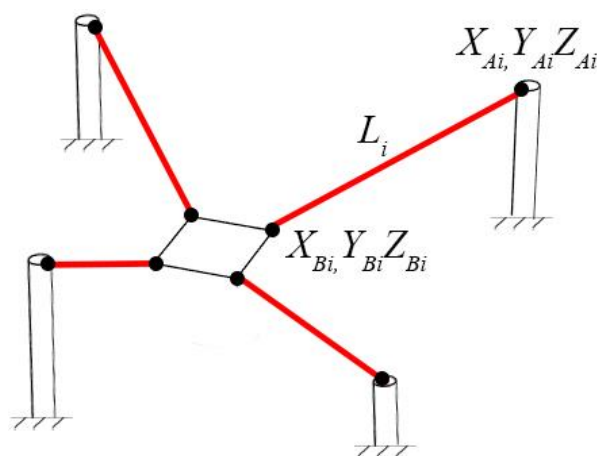


Рисунок 2 – Схема для розрахунку активних довжин кабелів

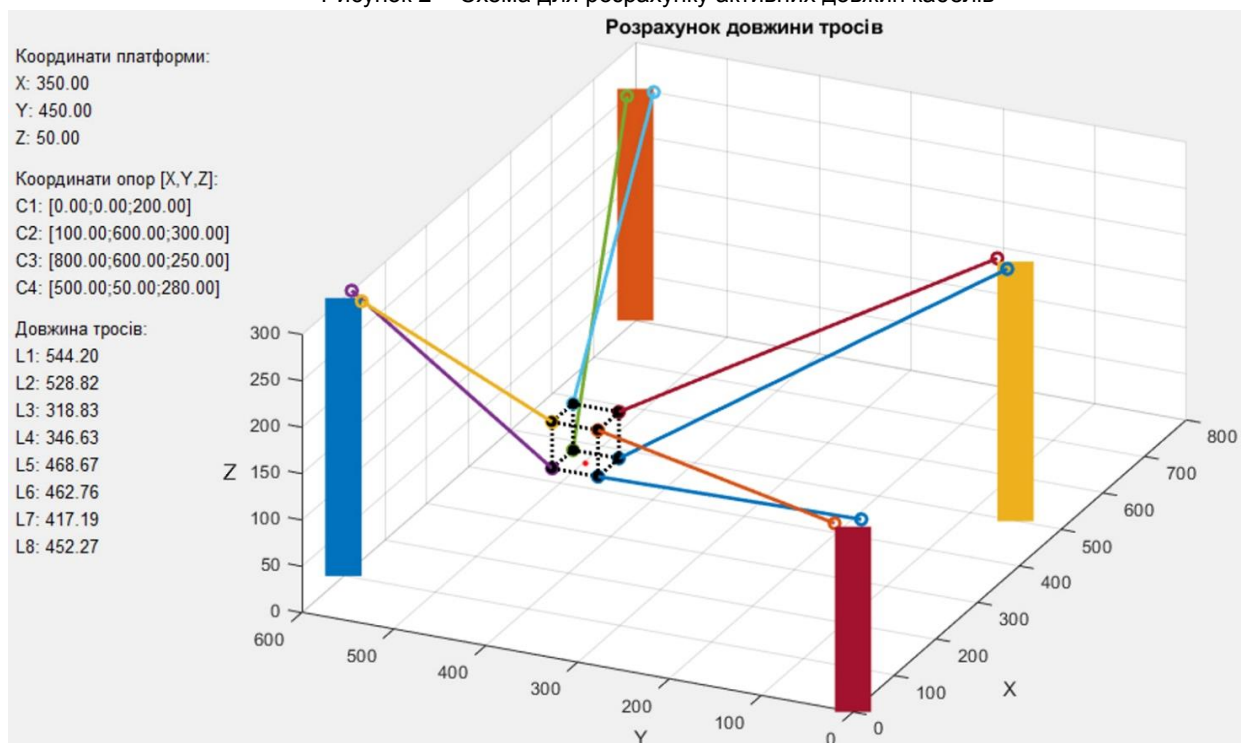


Рисунок 3 – Візуалізація зворотної задачі кінематики для 8-кабельного робота

Висновки. Проведене дослідження показало, що підвісний робот-маніпулятор здатен ефективно працювати в умовах складного рельєфу. Побудована модель зворотної кінематики демонструє адаптивність системи до різноманітних умов без необхідності симетричного або рівного розміщення опор.

Подальші дослідження варто зосередити на вдосконаленні моделі з урахуванням динамічних особливостей роботи та інтеграції елементів штучного інтелекту для покращення адаптивності системи.

Список використаних джерел

1. Угольников, Г.Г., Недо, А.О., Герасин, О.С. (2024). Аналіз особливостей сучасних роботів-маніпуляторів.
2. Zhang, Z., Shao, Z., You, Z., Tang, X., Zi, B., Yang, G., ... & Caro, S. (2022). State-of-the-art on theories and applications of cable-driven parallel robots. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 17(3), 37.
3. Sridhar, D. M. (2015). *Mathematical Modeling of Cable Sag, Kinematics, Statics, and Optimization of a Cable Robot* (Master's thesis, Ohio University).
4. Harandi, M. R. J. (2021). *Passivity based control of 3-DOF underactuated suspended cable-driven robot* (Doctoral dissertation, KN Toosi University of Technology).
5. Xia, X., Zhang, B., Ding, Y., Li, L., & Yang, Z. (2024). Output-feedback formation tracking control of autonomous surface vessels with collision avoidance. *Ocean Engineering*, 312, 119036.

УДК 519.6

Стогнієнко Є.В.

Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, м. Миколаїв

ПОРІВНЯННЯ НЕЧІТКИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ДЖЕРЕЛОМ ЖИВЛЕННЯ ДЛЯ ПЛАЗМОВОГО РІЗАННЯ

Плазмове різання—це процес термічного різання, який використовує високотемпературну плазмову дугу для розрізання електропровідних матеріалів [1]. Джерело живлення є критично важливим компонентом системи, оскільки воно забезпечує стабільне генерування дуги і контроль параметрів різання [2]. У цій статті розглядаються стратегії керування джерелом живлення для плазмового різання, зокрема порівняння лінійних пропорційних регуляторів і нечітких пропорційних регуляторів. Показані поверхневі діаграми ілюструють робочі характеристики цих регуляторів.

Для досягнення високих показників якості перехідного процесу в умовах складних нелінійних процесів застосовують нелінійні та адаптивні системи керування. [3,4]. Для реалізації нелінійного закону керування часто застосовують алгоритми на основі нечіткої логіки [5,4,6].

Метою цього дослідження було порівняти вплив максимальної величини сигналу керування на показники якості перехідного процесу. Це дасть змогу зробити припущення стосовно доцільності розширення робочого діапазону системи керування.

Нечіткі регулятори використовують лінгвістичні правила і функції належності для обробки нелінійностей і невизначеностей в системі, забезпечуючи високу адаптивність до складних систем, зокрема, плазмового різання. Серед переваг нечітких контролерів можна зазначити: нелінійність закону керування, адаптивність до змін у системі та гнучкість у роботі з нечіткими даними [5].

Порівняння регуляторів часто виконують на основі характеристик перехідних процесів, отриманих в результаті моделювання системи [7,8,9].

Проведено дослідження двох нечітких регуляторів, позначених як 1 і 2. Перший регулятор має максимальне значення виходу керування на рівні 1.4, а другий забезпечує збільшене значення.

Експериментальний нечіткий регулятор створено на основі іншого нечіткого регулятора, отриманого раніше [10]. Для експериментального нечіткого регулятора ми збільшили діапазон виходу керування та підібрали значення додаткової функції належності (рис. 1) таким, за якого залежність виходу від входу продовжується практично лінійно (рис. 2).

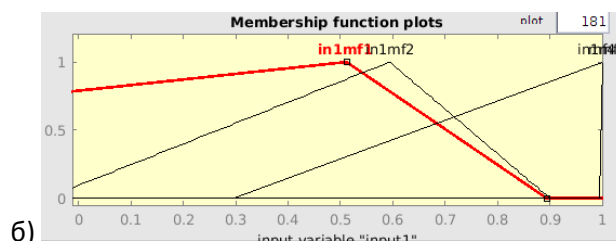
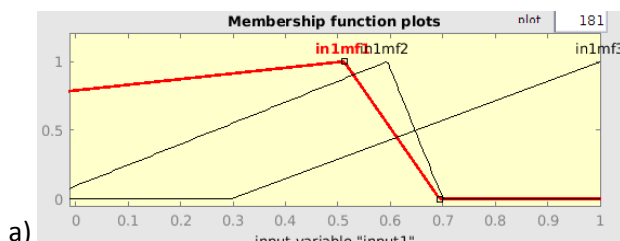


Рисунок 1 – Функції належності для регулятора

Регулятор 2 характеризується додатковим крутим піком близько до локалізованої функції належності mf4, яка забезпечує сигнал керування понад 1.4 для відхилень, близьких до одиниці.

Далі подамо правила нечітких регуляторів:

Перший нечіткий регулятор (3 правила)

1. Якщо (input дорівнює in1mf1) тоді (output дорівнює out1mf1) (1)
2. Якщо (input дорівнює in1mf2) тоді (output дорівнює out1mf2) (1)
3. Якщо (input дорівнює in1mf3) тоді (output дорівнює out1mf3) (1)

Другий нечіткий регулятор (4 правила)

1. Якщо (input дорівнює in1mf1) тоді (output дорівнює out1mf1) (1)
2. Якщо (input дорівнює in1mf2) тоді (output дорівнює out1mf2) (1)
3. Якщо (input дорівнює in1mf3) тоді (output дорівнює out1mf3) (1)
4. Якщо (input дорівнює in1mf4) тоді (output дорівнює out1mf4) (1).

З точки зору нечіткої логіки, ці правила описують просте однозначне відображення між функцією належності входу (in1mfX) та функцією належності виходу (out1mfX).

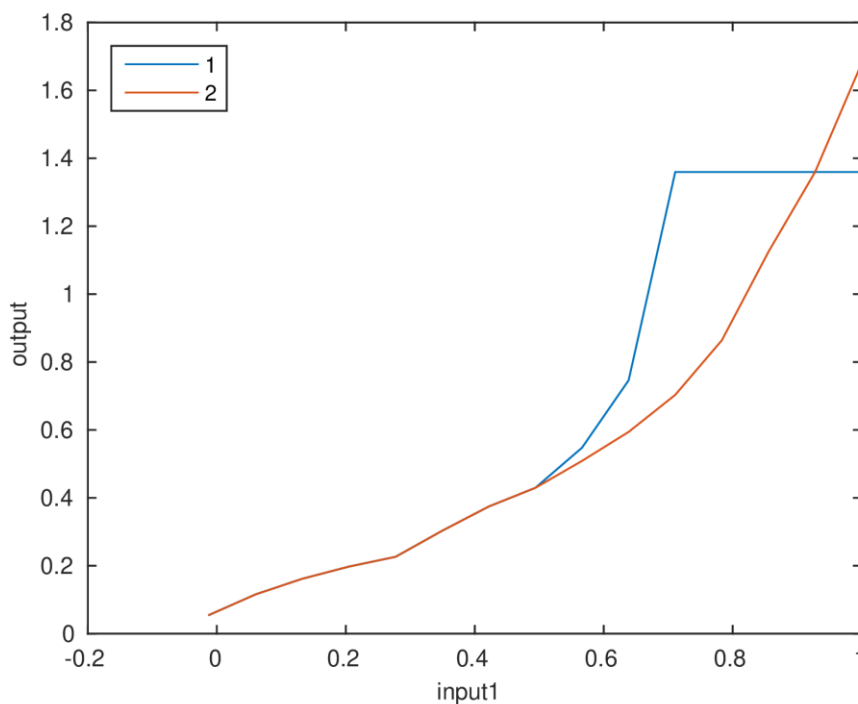


Рисунок 2 – Поверхневі діаграми регуляторів

Поверхневі діаграми на рис. 2 показують характер нелінійності та діапазон вихідного сигналу для обох типів регуляторів.

Для порівняння регуляторів використана симуляційна модель в Simulink, показана на рис. 3.

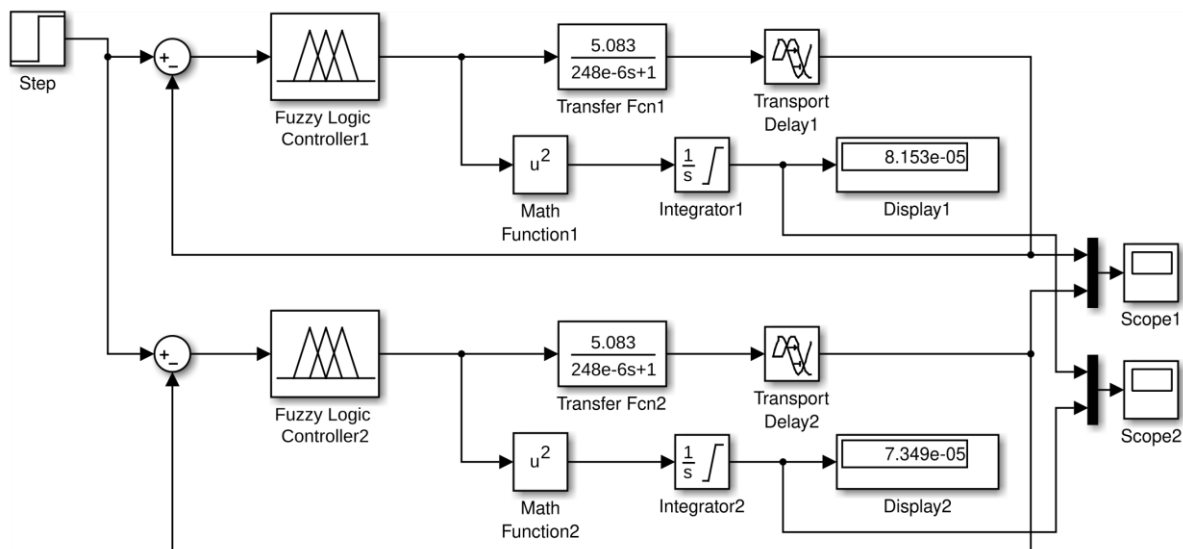


Рисунок 3 – Симуляційна модель системи

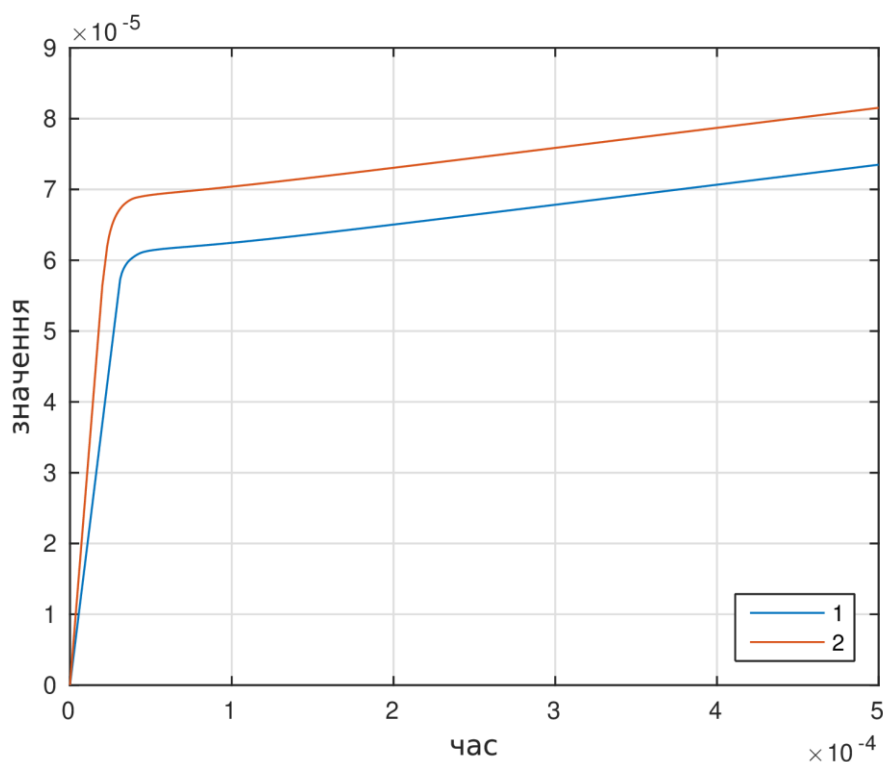


Рисунок 4 – Енергія керування

Енергія керування (рис. 4) відноситься до кількості «зусиль», які докладає регулятор для забезпечення мети керування. У цьому контексті її можна інтерпретувати як інтеграл від квадрата сигналу керування за часом.

Збільшення максимальної величини сигналу керування очікувано призводить до збільшення витрат енергії.

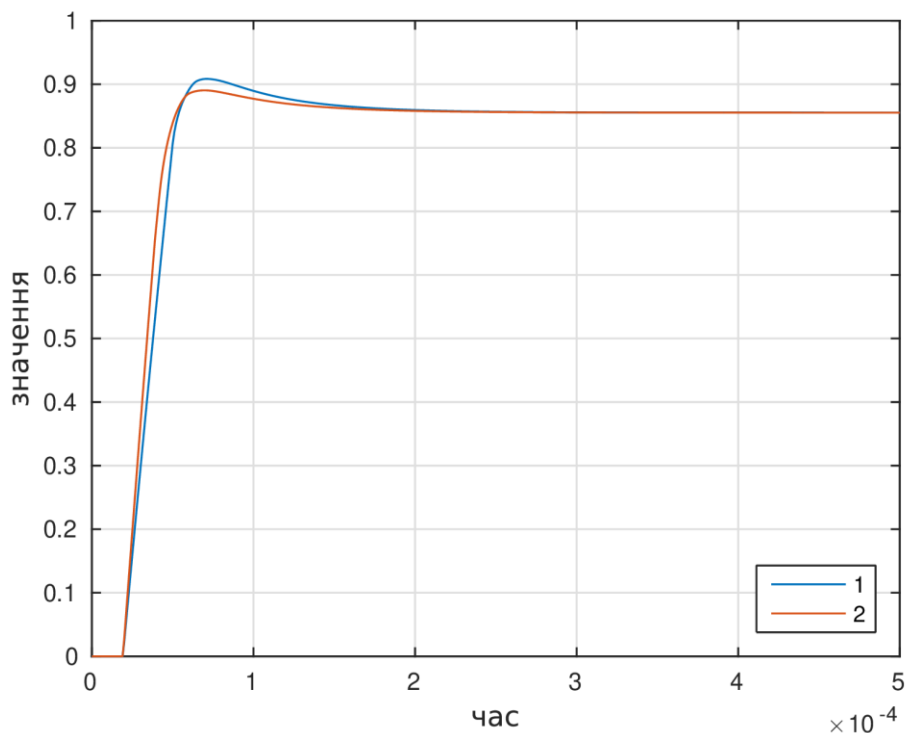


Рисунок 5 – Відгук системи

Показники якості перехідного процесу збільшилися (як видно на рис. 5), що також очікувано.

Висновки. Нечіткі регулятори забезпечують краще керування нелінійними системами завдяки своїй адаптивності та здатності обробляти невизначеності. Вони особливо підходять для застосувань, де вимагається висока точність і стабільність, наприклад, в плазмовому різанні.

Це дослідження надає інформацію про продуктивність лінійних і нечітких контролерів для джерел живлення плазмового різання і вказує на потенційні переваги та недоліки збільшення робочого діапазону системи керування.

Подальші дослідження можуть включати додатковий аналіз впливу інших особливостей нечіткого регулятора на продуктивність системи керування джерелом живлення.

Список використаних джерел

1. Плазмове оброблення [Електронний ресурс] / Wikipedia. – Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/Плазмове_оброблення (accessed: 21.04.2025).
2. Верещаго Е. Н. Схемотехника инверторных источников питания для дуговой сварки. учеб. пособие / Е. Н. Верещаго, В. Ф. Квасницкий, Л. Н. Мирошниченко, И. В. Пентегов. – Николаев : УГМУ, 2000. – 283 с.
3. Wikipedia. Nonlinear control [Electronic resource]. 2024. – Regime of access: https://en.wikipedia.org/wiki/Nonlinear_control (accessed: 13.02.2025).
4. Jin Y. et al. Review on the research progress of arc plasma power sources in china // IEEE Access. 2023. Vol. 11. P. 141394–141405.
5. Wikipedia. Fuzzy control system [Electronic resource]. 2025. – Regime of access: https://en.wikipedia.org/wiki/Fuzzy_control_system (accessed: 13.02.2025).
6. Jia D., He J., Zhao C. Fuzzy control and simulation for inverted plasma cutting power supply // 2009 9th international conference on electronic measurement & instruments. 2009. P. 3–523–3-527.
7. Control Guru. Comparing controller performance using plot data [Electronic resource]. 2015. – Regime of access: <https://controlguru.com/comparing-controller-performance-using-plot-data/> (accessed: 07.03.2025).
8. Гоголюк П. Ф. Теорія автоматичного керування. Навчальний посібник / П. Ф. Гоголюк, Т. М. Гречин – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2011. – 280с.
9. Performance Monitoring Fundamentals: Demystifying Performance Assessment Techniques [Electronic resource] / 1library. – Regime of access: <https://1library.net/document/y44w1j5y-performance-monitoring-fundamentals-demystifying-performance-assessment-techniques.html> (accessed: 21.04.2025).
10. Верещаго Є. М. та ін. Розробка нечіткої системи керування для джерела живлення плазмотрона // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці : XV Міжнародна науково-технічна конференція : матеріали. – Миколаїв : НУК, 2024. – 1032 с.

УДК 681.5

Костенко Д.В., к.т.н., доц., Трибулькевич С.Л., Трибулькевич В.В.

Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, м. Миколаїв

РОЗПОДІЛЕНА СИСТЕМА ЗБИРАННЯ ДАНИХ ТА ТЕЛЕКЕРУВАННЯ

У сучасних умовах стрімкого розвитку Інтернету речей (IoT) та зростання кількості розподілених пристроїв, що функціонують у віддалених або важкодоступних мережах, виникає необхідність у створенні надійних каналів зв'язку з такими пристроями. Значна частина подібних пристроїв підключена до мережі через маршрутизатори з використанням технології NAT (Network Address Translation), що ускладнює прямий доступ до них із глобальної мережі Інтернет. Зокрема, NAT приховує внутрішні IP-адреси пристроїв, що унеможливорює їх безпосереднє адресування ззовні без використання додаткових рішень.

Ця особливість створює серйозні технічні труднощі при реалізації систем централізованого керування віддаленими пристроями або збирання інформації з них у режимі реального часу. Традиційні методи, такі як переадресація портів (port forwarding) або використання статичних IP-адрес, часто є недоступними через обмеження провайдерів або з міркувань безпеки.

Метою роботи є розробка універсального рішення, яке дозволить забезпечити двосторонній зв'язок із пристроями за NAT без складних налаштувань мережевої інфраструктури з боку користувача.

При керуванні пристроями, що знаходяться в одній локальній мережі з ПК керування, проблем не виникає, так як IP адреси належать до однієї мережі. Якщо пристрій та ПК керування знаходяться в різних мережах, то для зв'язку потрібна маршрутизація трафіку. При доступу до налаштувань маршрутизаторів така задача вирішується «прокиданням» TCP або UDP портів. Самий складний і доволі розповсюджений випадок коли один з вузлів знаходиться в мережі за маршрутизатором провайдера, в такому випадку доступу до налаштувань маршрутизатору немає. Єдиним виходом з даної ситуації є використання серверів посередників у глобальній мережі, в такому випадку з'єднання з сервером встановлюється зі сторони пристрою. За таким принципом працює багато пропріетарних сервісів, таких як Sonoff, Tuuya та інші. Також подібні рішення використовують виробники систем відеоспостереження, коли кожен виробник має свої хмарні сервіси для підключення користувачів.

Попри зручність використання, такі сервіси мають низку обмежень, особливо в контексті безпеки, незалежності й технічного контролю:

1. Залежність від сторонніх серверів. Пристрої потребують постійного доступу до хмарних серверів виробника, якщо сервер недоступний (наприклад, техобслуговування, блокування, закриття компанії), пристрої можуть втратити частково або повністю свою функціональність.

2. Відсутність повного локального контролю. Більшість пристроїв не дозволяє повноцінне керування без підключення до Інтернету.

3. Проблеми з безпекою та конфіденційністю. Дані передаються через хмарні сервери, які можуть знаходитися за кордоном (наприклад, у Китаї), невідомо, як саме дані зберігаються, аналізуються або чи передаються третім сторонам, є ризик витоку даних, особливо для камер спостереження (Hikvision, Dahua), де це критично.

4. Геополітичні ризики. Деякі компанії (зокрема Dahua та Hikvision) вже під санкціями в деяких країнах через побоювання щодо шпигунства або порушення прав людини. Такі обмеження можуть призвести до блокування серверів або заборони використання.

5. Високі вимоги до інтернет-з'єднання. Навіть для локального керування (наприклад, через мобільний додаток вдома) потрібне стабільне з'єднання з Інтернетом.

6. Обмеження кастомізації та інтеграції. Пропріетарні протоколи й закриті API ускладнюють інтеграцію з власними платформами (наприклад, Home Assistant, Node-RED). Часто потрібні обхідні рішення або прошивання альтернативного ПЗ (наприклад, Tasmota для Sonoff).

7. Потенційні платні підписки. Деякі функції можуть стати платними (наприклад, розпізнавання облич, зберігання відео у хмарі). Це створює довгострокову залежність від платного сервісу.

Вказаних недоліків може бути лишена система, що будується на власних сервісах. Узагальнена мережева структура такої системи керування представлена на рис. 1.

У за власним маршрутизатором або у хмарі розгортається сервер VPN, який має публічну IP-адресу. Всі пристрої, що знаходяться за NAT (наприклад, вдома або в польових умовах), встановлюють ініціативне VPN-з'єднання з сервером у хмарі. Центральний сервер управління (який може бути будь-де в Інтернеті) також підключається до VPN-сервера. Завдяки VPN, всі пристрої знаходяться у віртуальній приватній мережі, що дозволяє безпосередньо обмінюватися даними та виконувати керування, незважаючи на NAT.

Для перевірки роботи такої системи було розгорнуто віртуальну машинку у хмарі Oracle. Такий сервер доволі легко реалізувати на базі образів CHR від Mikrotik, але програма Oracle Cloud Free Tier не дозволяє використання власних образів

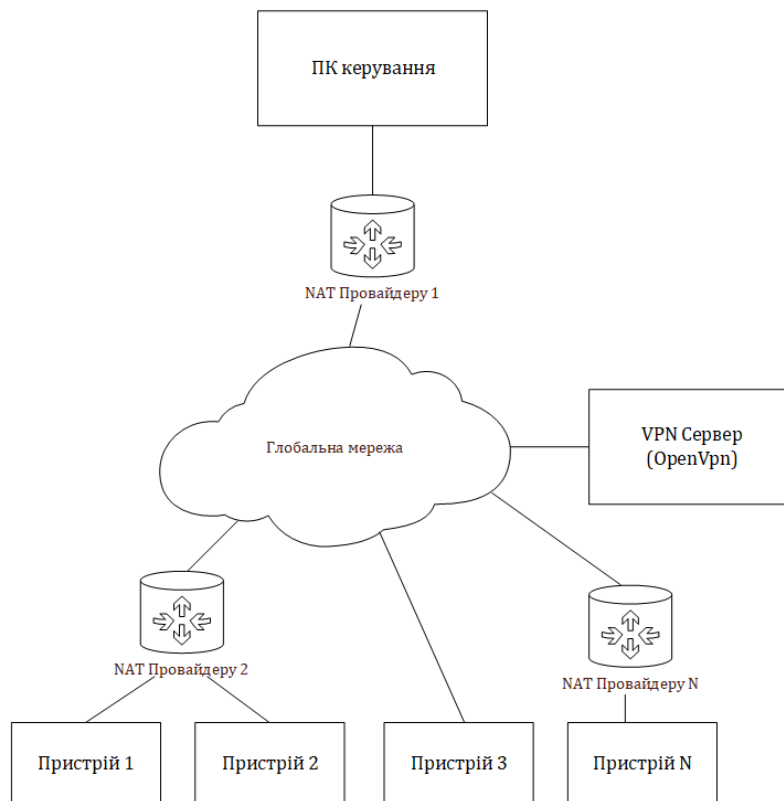


Рисунок 1 – Узагальнена схема мережі

Для перевірки роботи такої системи у хмарі Oracle обрано віртуальну машину під керуванням операційної системи Linux Debian (рис. 2). Система має IP адресу, що належить діапазону приватних мереж, але доступ до сервісів віртуальної машини може бути наданий через відкриття необхідних портів у налаштуваннях безпеки віртуальної хмарної мережі. Подібна система може бути реалізована і на повністю власному сервері, що знаходиться за маршрутизатором з білою IP адресою. Це з одного боку підвищує безпеку через незалежність від роботи обладнання сторонніх організацій, але в умовах нестабільності роботи як електричних, так і телекомунікаційних мереж в Україні може призводити до нестабільності роботи.

До додаткових переваг використання хмарного сервісу можна віднести маскування реальної IP адреси при виході до мережі Інтернет за рахунок того, що весь трафік може перенаправлятися через тунель (рис. 3).

Applied filters: Compartment lynxsl (root)

Create instance Actions

☐	Name	State	Public IP	Private IP	Shape	OCPU count	Memory (GB)	Availability domain	Fault domain	Created	
☐	VPN-Ubuntu	Always Free	Running	89.168. [redacted]	10.0.0.97	VM.Standard.E2.1.Micro	1	1	AD-1	FD-2	Mar 18, 2025,

VPN-Ubuntu Running

Instance details

Details Networking Storage Security Management OS Management Monitoring Work requests Tags

General information

Availability domain	AD-1
Fault domain	FD-2
Region	eu-frankfurt-1
OCID	ocid1.instance.oc1.eu-frankfurt-1.antheljtqo7xttqcd4per2c6rex4vo7syq6tswr4mqofdhzqmbjql4vvpwfa
Launched	Tue, 18 Mar 2025 11:42:03 UTC
Compartment	lynxsl (root)
Capacity type	On-demand

Рисунок 2 – Віртуальна машина з VPN сервером у хмарі

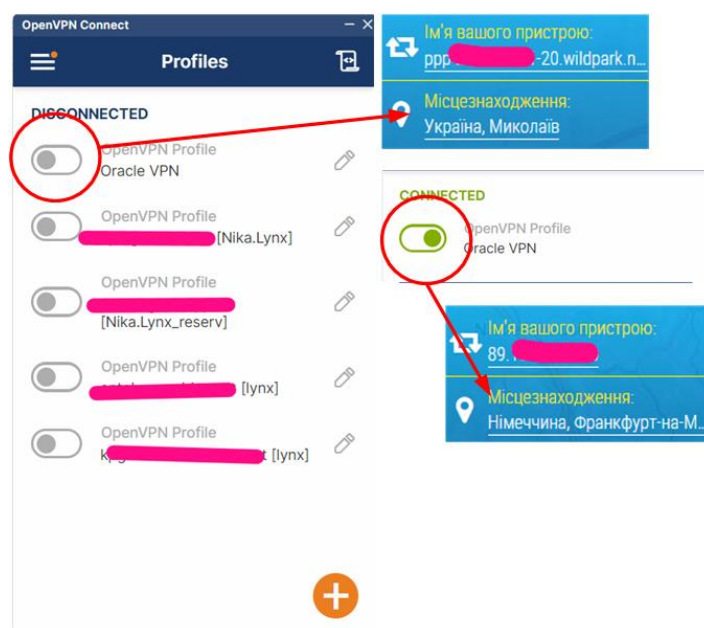


Рисунок 3 – Перенаправлення трафіку через VPN тунель

Прикладом використання подібної системи може бути система телекерування роботом (рис. 4).

Система керування рухом даного роботу побудована на базі мікроконтролеру Atmega328. За зв'язок відповідає модуль ESP32, який обмінюється даними з контролером руху через інтерфейс UART. Даний модуль зв'язку передбачає лише бездротовий інтерфейс WiFi обміну даними з комп'ютером керування, тому дальність роботи буде обмежена розмірами локальної мережі. Для збільшення дальності можливо використання аналогічного модуля, але із вбудованим GSM модемом рис. 5. Але OpenVPN використовує повноцінний SSL/TLS-стек, шифрування на основі OpenSSL (або mbedTLS), управління сертифікатами, TCP/UDP-обробку — це ресурсоємно. ESP32 має обмежену оперативну пам'ять (до ~520 КБ RAM) та обчислювальні можливості, чого недостатньо для стабільної роботи OpenVPN. Наразі немає офіційної або спільнотної реалізації OpenVPN-клієнта для ESP32. Навіть якщо зібрати мінімальну версію з сильно обрізаними можливостями — вона не буде стабільно працювати, особливо з використанням сертифікатів, TLS-шифрування, перевірки ключів.

Тому для повноцінної роботи через різноманітні канали зв'язку доцільно використовувати маршрутизатор, наприклад Mikrotik чи OpenWRT, або міні ПК типу Raspberry Pi на які буде покладено функції клієнта OpenVPN та задачі маршрутизації трафіку.

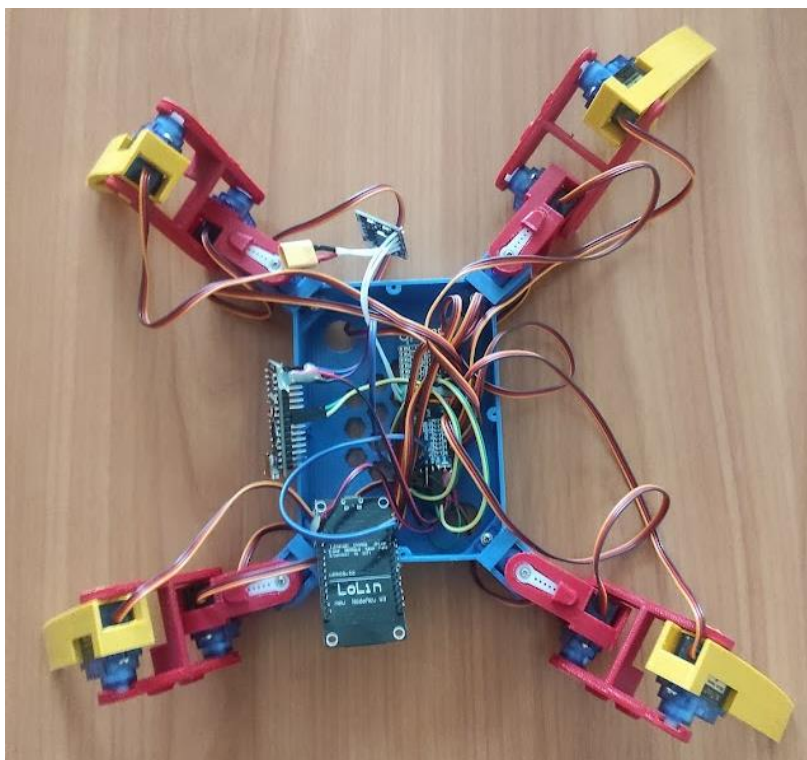


Рисунок 4 – Робот, як приклад пристрою системи телекерування

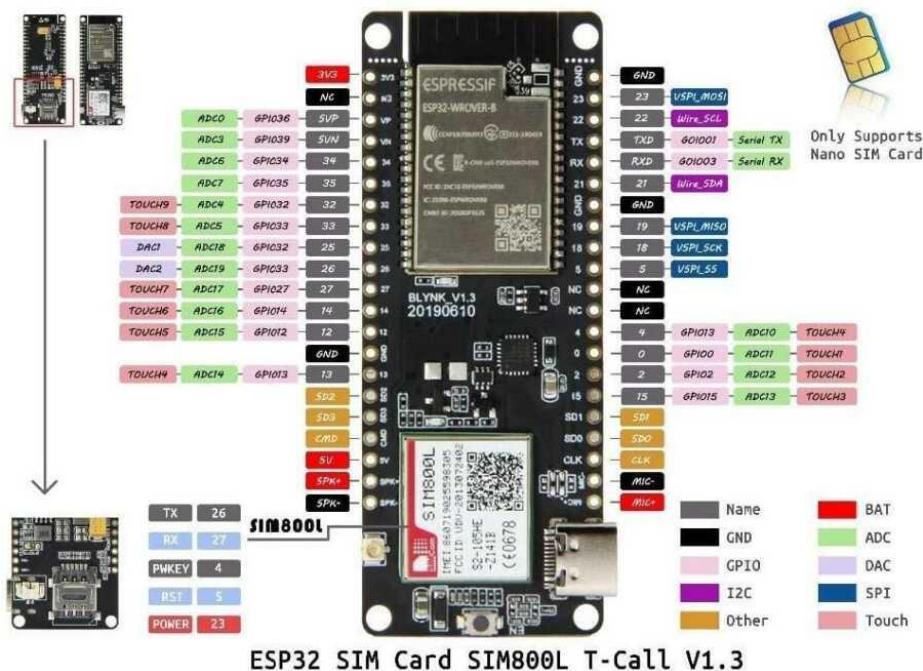


Рисунок 5 – Модуль зв'язку ESP32 з GSM модемом

Висновки. Розробка такої системи є актуальною як для приватного, так і для промислового використання, зокрема у сферах автоматизації, моніторингу, безпеки, "розумного будинку" та інших галузях, де важливим є стабільний та захищений канал зв'язку з віддаленими пристроями. Тому запропоноване дослідження спрямоване на створення ефективного підходу до вирішення проблеми доступу та керування пристроями, розташованими за NAT, що має як наукове, так і практичне значення.

Список використаних джерел

1. Docs Center-Tuya Developer. Tuya Developer - Tuya Smart - Global Developer Platform. URL: <https://developer.tuya.com/en/docs/iot> (date of access: 19.04.2025).
2. ESP-IDF Programming Guide. Technical Documents. Espressif Systems. URL: <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/stable/esp32/index.html> (date of access: 18.04.2025).
3. Guide To Set Up & Configure OpenVPN Client/Server VPN | OpenVPN. OpenVPN. URL: <https://openvpn.net/community-resources/how-to/> (date of access: 18.04.2025).

4. Knowledge base. SONOFF Smart Home. URL: <https://support.itead.cc/support/solutions> (date of access: 18.04.2025).

5. Oracle Cloud Infrastructure User Guide. Oracle. URL: https://docs.oracle.com/cd/E97706_01/pdf/ug/OCI_User_Guide.pdf (date of access: 18.04.2025).

УДК 631.4:681

*Трешнюк А.І., студент гр. 4391, Дьяконов О.С., к.т.н., доцент
Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, м. Миколаїв*

ІНТЕРАКТИВНА КАРТА УКРАЇНИ ЯК ІНСТРУМЕНТ ОПЕРАТИВНОГО ІНФОРМУВАННЯ НАСЕЛЕННЯ В УМОВАХ ВІЙНИ ТА ЗМІН ПОГОДНИХ УМОВ

В епоху, позначену підвищеною обізнаністю про безпеку та фактори навколишнього середовища, розвиток технологій відображення інформації привернув значну увагу. Одним із таких інноваційних рішень є інтерактивна карта України, яка надає важливу інформацію в реальному часі через привабливий і доступний графічний інтерфейс.

Інтерактивна карта України розроблена, щоб служити життєво важливим інструментом для користувачів, яким потрібен негайний доступ до важливої інформації щодо безпеки та стану навколишнього середовища. На карті є сигналізація про повітряні загрози, карта погоди, нічник та інші режими. Вона спрямована на покращення ситуаційної обізнаності користувачів, особливо в прифронтових регіонах.

Мета роботи – розробка апаратно-програмного комплексу відображення інформації у вигляді інтерактивної карти України.

Основна частина. Інтерактивна карта використовує можливості мікроконтролерів ESP32 і світлодіодів RGB, щоб забезпечити динамічний і тактильний досвід користувача.

Основні особливості включають (рис. 1):

- **Карта тривоги:** інтегруючи дані в реальному часі з виділеного сервера, ця функція сповіщає користувачів про неминучі небезпеки, такі як ракетні удари, загрози БПЛА, КАБи і вибухи. Сповіщення передаються за допомогою візуальних сигналів (зміни кольору світлодіодів).

- **Карта погоди:** інтерактивна карта містить інтерфейс прикладного програмування (API) погоди, який оновлює користувачам інформацію про поточні погодні умови, включаючи сповіщення про температуру. Ця функція життєво важлива для планування та безпеки.

- **Нічне освітлення:** світлодіоди RGB можна налаштувати для забезпечення освітлення в помешканні.

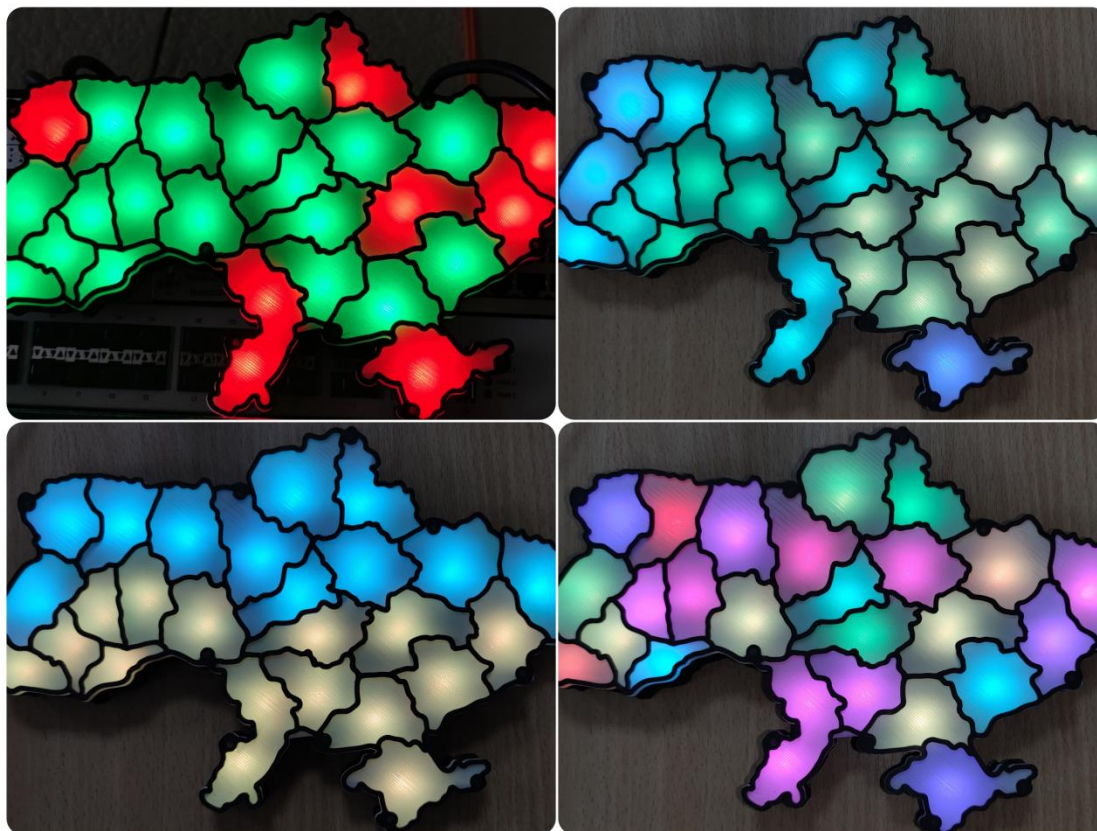


Рисунок 1 – Режими інтерактивної карти України (зліва направо зверху вниз: карта тривоги, карта температур, прапор України, режим випадкових кольорів)

Інтерактивна карта України має **ряд переваг**, які підвищують доступність і зручність використання:

- **Повідомлення в реальному часі:** миттєвий зворотний зв'язок щодо загроз за допомогою візуальних сигналів дозволяє користувачам швидко й ефективно реагувати, потенційно рятуючи життя під час надзвичайних ситуацій.
- **Залучення користувачів:** інтерактивний характер карти заохочує користувачів активно взаємодіяти з інформацією, сприяючи більш поінформованому співтовариству щодо безпеки та екологічних умов.
- **Масштабованість:** базова технологія, заснована на ESP32, забезпечує масштабованість і налаштування, що робить її адаптованою до різних регіонів або конкретних вимог користувача.

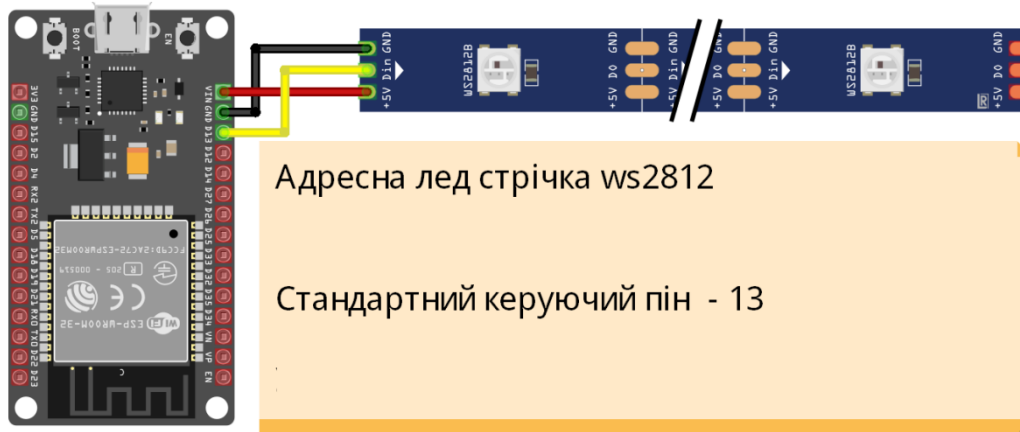


Рисунок 2 – Схема підключення компонентів інтерактивної карти

Хоча інтерактивна карта України демонструє значний потенціал, вона також стикається з кількома проблемами, які необхідно вирішити для ефективного розгортання.

Розробка сервера: Створення надійної серверної інфраструктури, яка може обробляти дані в реальному часі з багатьох джерел – API тривоги та API погоди), є складним завданням. Забезпечення точності даних і мінімізація затримки має вирішальне значення для ефективності сповіщень.

Виготовлення основної частини карти: фізичне виготовлення основної частини карти створює проблеми, зокрема вибір матеріалів, довговічність та інтеграцію електронних компонентів. Досягнення балансу між зручністю використання та економічністю вимагає ретельного планування.

Програмування ESP32: розробка програмного забезпечення, яке керує мікроконтролером ESP32, вимагає тривалого навчання. Правильне програмування необхідне для забезпечення безперебійного функціонування карти та точної відповіді на вхідні дані.

Навчання користувачів: щоб карта була ефективною, користувачам може знадобитися навчання, щоб зрозуміти різні функції та як інтерпретувати тактильні та візуальні сигнали. Цей освітній аспект є важливим для максимізації впливу технології.

Висновки. Розроблена інтерактивна карта України являє собою дієвий інструмент для оперативного відображення критично важливої інформації, такої як повітряні тривоги та поточні погодні умови. Завдяки інтуїтивно зрозумілому інтерфейсу та можливості налаштування режимів підсвітки, користувачі отримують зручний та ефективний спосіб візуалізації геопросторових даних у реальному часі.

Представлений проєкт демонструє потенціал веб-картографічних технологій для підвищення обізнаності громадян та забезпечення швидкого доступу до актуальної інформації в умовах динамічних подій. Подальший розвиток карти, зокрема розширення набору відображуваних даних та інтеграція з мобільними платформами, може значно розширити її практичне застосування та сприяти підвищенню рівня безпеки та комфорту життєдіяльності населення.

Таким чином, розробка інтерактивної карти України є важливим кроком у напрямку створення інформаційних систем, орієнтованих на потреби користувачів та здатних оперативно реагувати на актуальні виклики.

Список використаних джерел

1. Lawhead, J. B. Learning Geospatial Analysis with Python - Third Edition. Packt Publishing, 2019.
2. Божко, В. В., & Шеховцов, Р. О. Веб-картографія: навчальний посібник. Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, 2018.
3. Kalinin, S., & Krylov, V. Practical 3D Printing: The definitive guide to 3D printing with FDM. APRESS, 2016.
4. Srivastava, S. ESP32 Programming for the Internet of Things: Learn to build smart and connected devices with ESP32. Packt Publishing, 2018.
5. Теслюк В. М. та ін. Проєктування пристроїв IoT з використанням мікроконтролерів AVR та ESP. Львів: Львівська політехніка, 2024. – 220 с.

УДК 681.518.3

Прищепов Є. О., Грєшинов А. Ю., доцент

Національний університет кораблебудування ім. адмірала Макарова, м. Миколаїв

МОДЕЛЮВАННЯ РЕФЛЕКТОМЕТРИЧНОГО ВИМІРЮВАЛЬНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА РІВНЯ НА БАЗІ ІНТЕГРАЛЬНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА «ЧАС-КОД»

Одним з найбільш поширених видів вимірювань є вимірювання рівня рідких та сипких середовищ. Це призвело до розробки цілого ряду методів вимірювання рівня. Одним з них є метод імпульсної рефлектметрії, заснований на аналізі реакції об'єкта, що досліджується, на короткий зонduючий імпульс [1]. Під коротким імпульсом в даному випадку розумітиметься як імпульс наносекундної тривалості, так і більш тривалий імпульс з фронтом наносекундної тривалості. Реакція виявляється у появі відбитих від неоднорідностей об'єкта імпульсів.

Стосовно задачі вимірювання рівня, в якості об'єкту виступає чутливий елемент (ЧЕ), конструктивно виконаний у вигляді двопровідної електричної лінії і встановлений в резервуарі з контрольованим середовищем (середовищами). Аналізуючи рефлектограму (сукупність зонduючого та відбитих імпульсів), можна визначити відстань до неоднорідності за формулою:

$$L = 0,5 \cdot \theta \cdot t_d, \quad (1)$$

де θ – швидкість поширення імпульсу в ЧЕ; t_d – час затримки відбитого імпульсу відносно зонduючого.

Знаючи цю відстань, можна обчислити значення рівня.

На основі методу імпульсної рефлектметрії, за участю авторів, були розроблені різноманітні засоби вимірювань рівня та інших параметрів зберігання рідких та сипких середовищ. Деякі з них розглянуті у роботах [2-4]. Метод стробоскопічного перетворення [5], що використовується в цих засобах вимірювань для трансформації масштабу часу з наносекундного в мілісекундний діапазон, є складним у реалізації та призводить до похибок. Похибки виникають з огляду на те, що для визначення рівня необхідно вимірювати затримки відбитих імпульсів, а стробоскопічне перетворення впливає на точність цих вимірювань.

У роботі [6] було запропоновано відмовитися від стробоскопічного перетворення та вимірювати затримки відбитих імпульсів за допомогою інтегрального перетворювача «час-код». Однак, якщо в резервуарі зберігаються два контрольні незмішуваних середовища (наприклад, нафта і підтоварна вода), то запропонована конструкція вимірювального перетворювача не дозволяє вимірювати рівень межі розділу цих середовищ (можливо вимірювання тільки загального рівня). У роботі [7] було запропоновано вирішення цієї проблеми за рахунок заміни зонduючого імпульсу типу «відеоімпульс» на зонduючий імпульс типу «перепад напруги». Однак у цій роботі було наведено лише найзагальніший принцип дії вдосконаленого вимірювального перетворювача рівня без моделювання його функціонування.

Метою роботи є моделювання функціонування вдосконаленого вимірювального перетворювача рівня, описаного у роботі [7].

При підготовці до моделювання вдосконаленого вимірювального перетворювача рівня були зроблені розрахунки для резервуара, призначеного для зберігання скрапленого газу (рис. 1).

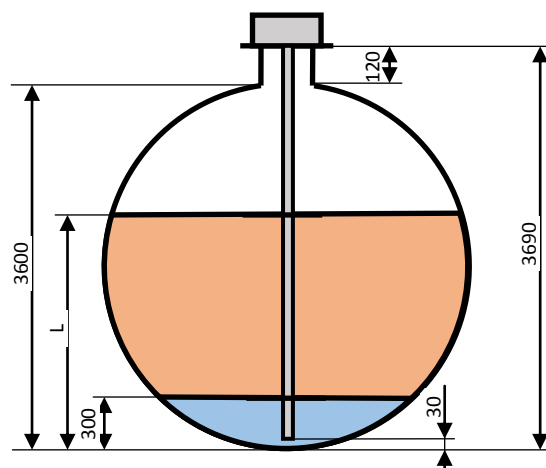


Рисунок 1 – Резервуар, призначений для зберігання скрапленого газу

Результати розрахунків наведено у таблиці 1. Були обчислені довжини ділянок ЧЕ, встановленого в резервуарі, та час проходження імпульсів цими ділянками при різних значеннях рівня газу. Рівень межі розділу рідких середовищ «газ-вода» має при цьому постійне значення. Для отримання часу затримки відбитих імпульсів щодо зонduючого необхідно значення часу, наведені у таблиці 1, помножити на два, тому що імпульс при відбитті проходить подвійну відстань.

Таблиця 1 – Результати розрахунків

Рівень L, % (мм)	Парова фаза		Газ		Вода	
	Довжина, мм	Час, нс	Довжина, мм	Час, нс	Довжина, мм	Час, нс
10 (360)	3360	11,2	60	0,3	270	8,1
20 (720)	3000	10	420	2,1	270	8,1
30 (1080)	2640	8,8	780	3,9	270	8,1
40 (1440)	2280	7,6	1140	5,7	270	8,1
50 (1800)	1920	6,4	1500	7,5	270	8,1
60 (2160)	1560	5,2	1860	9,3	270	8,1
70 (2520)	1200	4	2220	11,1	270	8,1
80 (2880)	840	2,8	2580	12,9	270	8,1
90 (3240)	480	1,6	2940	14,7	270	8,1

За допомогою програмного забезпечення «Micro-Cap» була створена модель зондування ЧЕ імпульсом типу «перепад напруги» із тривалістю фронту 1 нс, яка представлена на рис. 2. У моделі задані параметри, що відповідають рівню газу, відповідного 50% від висоти резервуара.

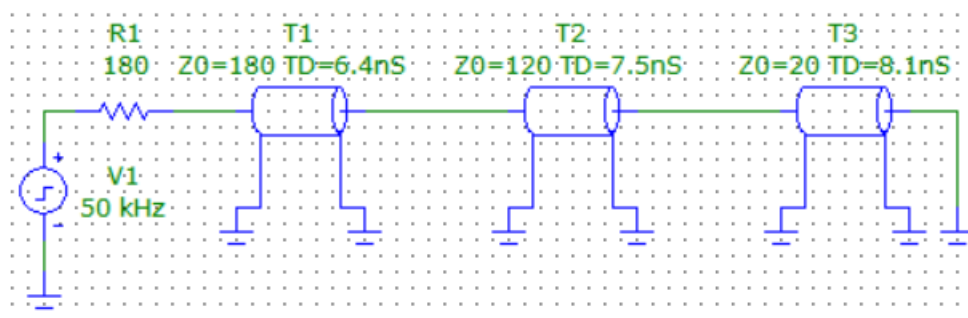
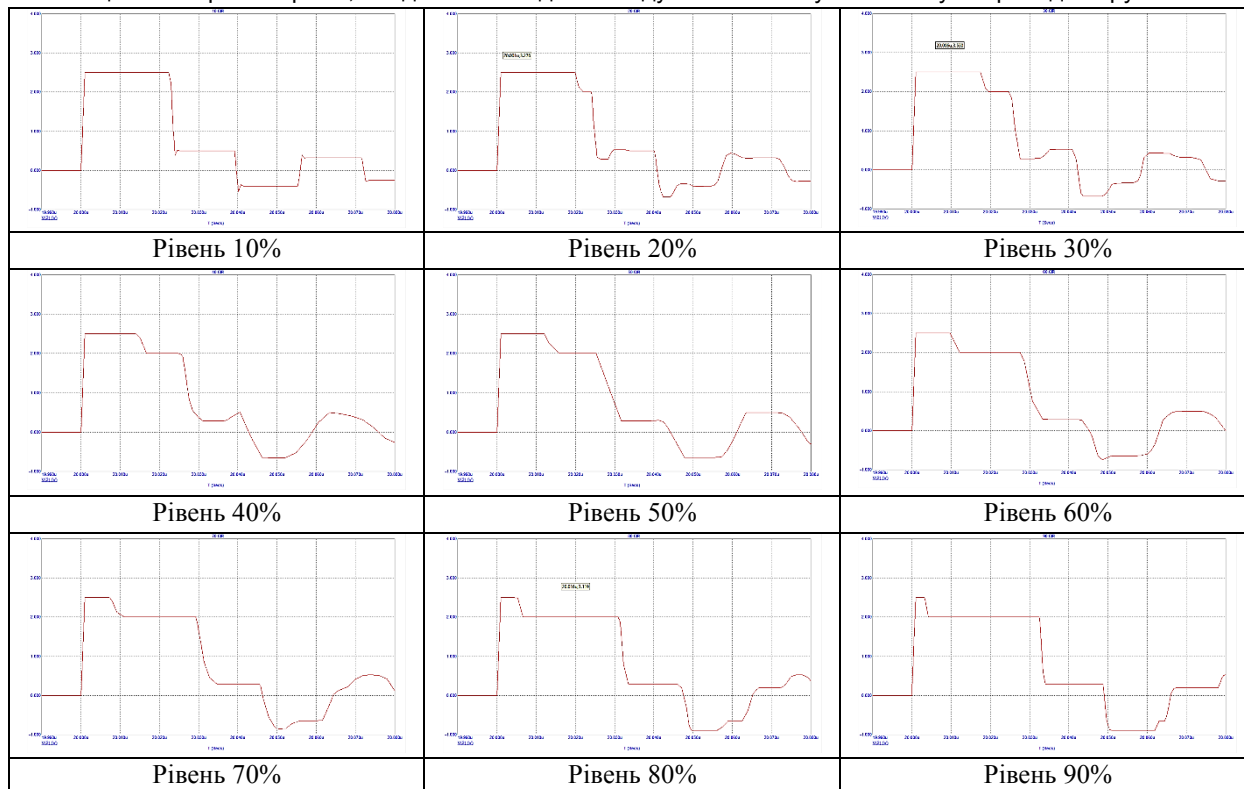


Рисунок 2 – Модель зондування ЧЕ

За допомогою моделі, наведеної на рис. 2 і на основі розрахунків, наведених у таблиці 1, були змодельовані рефлектограми при різних значеннях рівня газу (у відсотках від висоти резервуару), які наведені у таблиці 2.

Таблиця 2 – Рефлектограми, змодельовані під час зондування ЧЕ імпульсом типу «перепад напруги»



Висновки. Моделювання функціонування вдосконаленого вимірювального перетворювача рівня показало, що він дозволяє вимірювати не тільки загальний рівень, але також і рівень межі розділу незмішуваних середовищ. При цьому схема генерації зонduючого імпульсу типу «перепад напруги» простіше, ніж схема генерації зонduючого імпульсу типу «відеоімпульс».

Список використаних джерел

1. Andrews J.R. Time Domain Reflectometry // Symposium and Workshop on Time Domain Reflectometry in Environmental, Infrastructure, and Mining. – Washington: Bureau of Mines, 1994. – P. 4-13.
2. Zhukov Y.D., Gordeev B.N., Greshnov A.Y., Prischepov E.O. Onboard computer aided system for monitoring and control of stability affecting parameters // Proc. of the 6-th International Conf. on Stability of Ships and Ocean Vehicles (STAB'97). – Varna (Bulgaria), 1997. – V. II. – P. 239-245.
3. Гордєєв Б.М., Прищепов Є.О. Модульний принцип побудови базового блоку рефлектометричної інформаційно-вимірювальної системи. Матеріалі Міжнар. наук. –практ. симпозиуму «Проблеми суднобудування: стан, ідеї, рішення». – Миколаїв: УДМТУ, 1997. – С. 258.
4. Zhukov Y.D., Gordeev B.N., Logvinenko Y.I., Prischepov E.O. Computerized maritime polymetric systems // Proc. of the 2-th International Conf. on Marine Industry (MARIND'98). – Varna (Bulgaria), 1998. – V. III. – P. 245-252.
5. Zang, Xiaoxuan, Jianting Zhao, Yunfeng Lu, and Qing He. 2022. "Precision Measurement System of High-Frequency Signal Based on Equivalent-Time Sampling" Electronics 11, no. 13: 2098.
6. Прищепов Є.О. Рефлектометричний перетворювач рівня на базі інтегрального перетворювача «час-код». Сучасні проблеми автоматики та електротехніки : матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції. – Миколаїв: НУК, 2023. – С. 42-45.
7. Прищепов Є.О. Удосконалення рефлектометричного вимірювального перетворювача рівня. Сучасні проблеми автоматики та електротехніки : матеріали всеукраїнської науково-технічної конференції. – Миколаїв: НУК, 2024. – С. 31-32.

УДК 621.314.26

Верещаго Є. М., к. т. н., Єременко А. П., Джангіров М. В.

Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, м. Миколаїв

СИНТЕЗ ПІД-РЕГУЛЯТОРІВ ІМПУЛЬСНИХ ДЖЕРЕЛ ЖИВЛЕННЯ ПЛАЗМОТРОНІВ ЗАСОБАМИ СИСТЕМИ MATLAB/SIMULINK

Електроплазмові технології набули широкого розповсюдження, зокрема в металообробці. Одним із важливих застосувань є плазмове різання металу. Перевагами таких систем є висока швидкість різання і якість сформованої поверхні деталей. Робочим органом систем плазмового різання є плазмотрон, який зазвичай живиться від імпульсного джерела постійного струму. Якість різання залежить від стабільності струму електричної дуги плазмотрону. Отже саме джерело живлення плазмової системи (ДЖПС) є найбільш важливим елементом, який впливає на якість і ефективність технологічних процесів різання металу. До ДЖПС висуваються вимоги високої стабільності струму дуги, ККД, низького рівня електромагнітних завад. Відповідно дослідження шляхів підвищення даних параметрів ДЖПС є актуальним.

Сучасні ДЖПС побудовані на основі імпульсного перетворювача (ІП) з системою керування, яка використовує зворотній зв'язок за струмом. Для створення сигналів керування силовими транзисторами часто використовується цифровий ПІД-регулятор [1]. Питанням проектування цифрових систем керування присвячені роботи [1-3]. У роботах [4, 5] розглянуто питання синтезу нейро-нечіткого регулятора. Однак, у означених роботах не використовуються імітаційні моделі об'єкта керування.

Метою роботи є дослідження методик синтезу ПІД-регуляторів ІП ДЖПС з використанням імітаційних моделей елементів схеми ДЖПС.

Керування ІП ДЖПС.

Сучасні ІП ДЖПС для установок плазмового різання побудовані на основі повномостового ІП. Схема такого ІП наведена на рисунку 1. В її складі присутні елементи забезпечення м'якої комутації транзисторів, що дозволяє знизити втрати потужності в них [6].

Керування ІПДЖПС здійснюється шляхом формування широтно-імпульсно модульованих сигналів, які подаються на затвори транзисторів. Для підвищення ККД ІП може бути використаний керований вторинний випрямляч замість діодів VD5, VD6. Також, враховуючи значну потужність ДЖПС, доцільним є використання активного коректора коефіцієнта потужності і керованого первинного випрямляча.

Оскільки основним фактором, що впливає на якість різання, є стабільність струму дуги плазмотрона, зворотній зв'язок реалізовано за струмом, який може вимірюватися у вторинній або первинній обмотці трансформатора. Додатково використовується зворотній зв'язок за напругою.

Таким чином, система керування ІПДЖПС відноситься до систем класу МІМО (декілька входів і виходів). Вона будується на високошвидкісних мікроконтролерах, таких як сімейство C2000 фірми Texas Instruments. Важливим питанням у процесі проектування системи керування ІПДЖПС є вибір закону керування. Незважаючи

на застосування нечітких і нейромережевих регуляторів [4] найбільш поширеним є ПІД- або ПІ-закон керування. Таким чином, синтез регулятора зводиться до визначення коефіцієнтів складових ПІД-закону і декількох параметрів реалізації цього закону за допомогою мікроконтролера, таких як постійна часу фільтра для реалізації диференційної складової і т. і. Для вирішення цієї задачі доцільно використання моделювання на основі імітаційних моделей.

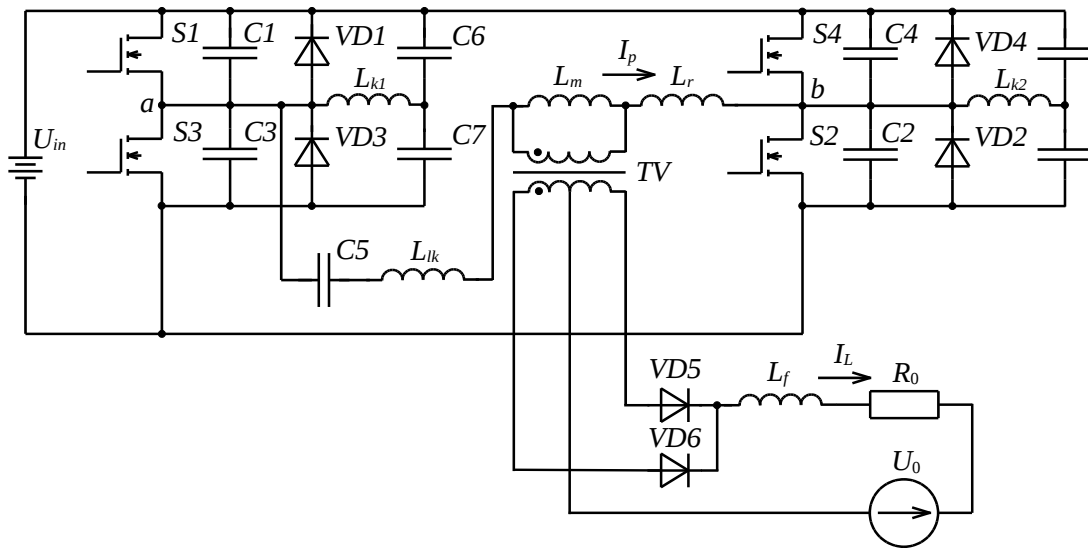


Рисунок 1 – Повномостовий ІП ДЖПС

Імітаційна модель ДЖПС.

Спрощена імітаційна модель ДЖПС, створена у середовищі Simulink, представлена на рисунку 2. Задане значення струму дуги (100 A) моделюється блоком Step. Вимірювання струму дуги здійснюється датчиком з коефіцієнтом перетворення (блок Gain) $7,5 \cdot 10^{-4}$. Блок передатної функції $\frac{82}{19,2 \cdot 10^{-6}s + 1}$ відображає затримку обрахунку вихідного сигналу регулятора. Коефіцієнт 0,4 відображає процес формування широтно-імпульсних сигналів. Кероване джерело напруги дозволяє поєднати блоки Simscape Electrical (елементи електричних кіл) і звичайні блоки Simulink. Елементи R і L відображають вихідні кола і навантаження ДЖПС.

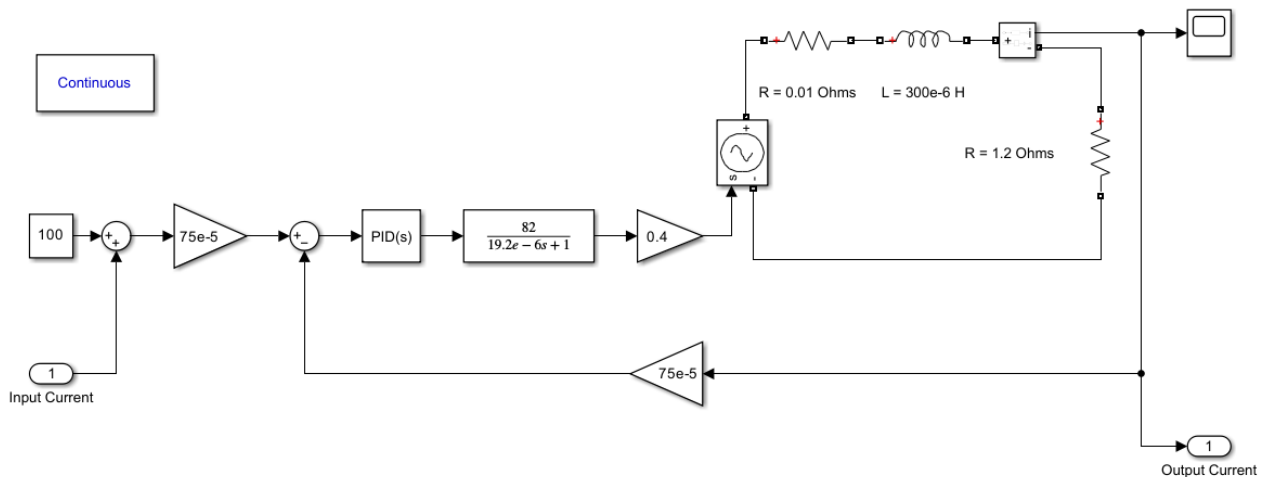


Рисунок 2 – Імітаційна модель ДЖПС

Синтез регулятора ІПДЖПС.

Узагальнюючи дані робіт [1-3], можна дійти висновку, що до регулятора струму ІПДЖПС висуваються наступні вимоги: перерегулювання до 10 %, час регулювання до 0,33 мс, запаси стійкості за амплітудою 20 дБ, за фазою 50°. Для синтезу регулятора використаємо пакет Simulink Design Optimization системи MATLAB [7, 8]. Початкові значення параметрів ПІД-регулятора обрано $K_P = K_I = 1, K_D = 0$. Вихідний струм ІП подається на блок Check Step Response Characteristics, який використовується для контролю параметрів перехідного процесу. У параметрах цього блоку вказано наступні обмеження: перерегулювання 10% (Overshoot), тривалість перехідного процесу 0,33 мс (Settling time), час зростання 0,25 мс (Rising time), припустиме відхилення від усталеного значення (% Settling) 3%, рівень сигналу для визначення часу зростання 80% (% Rise). Обмеження перехідного процесу наведено на рисунку 3.

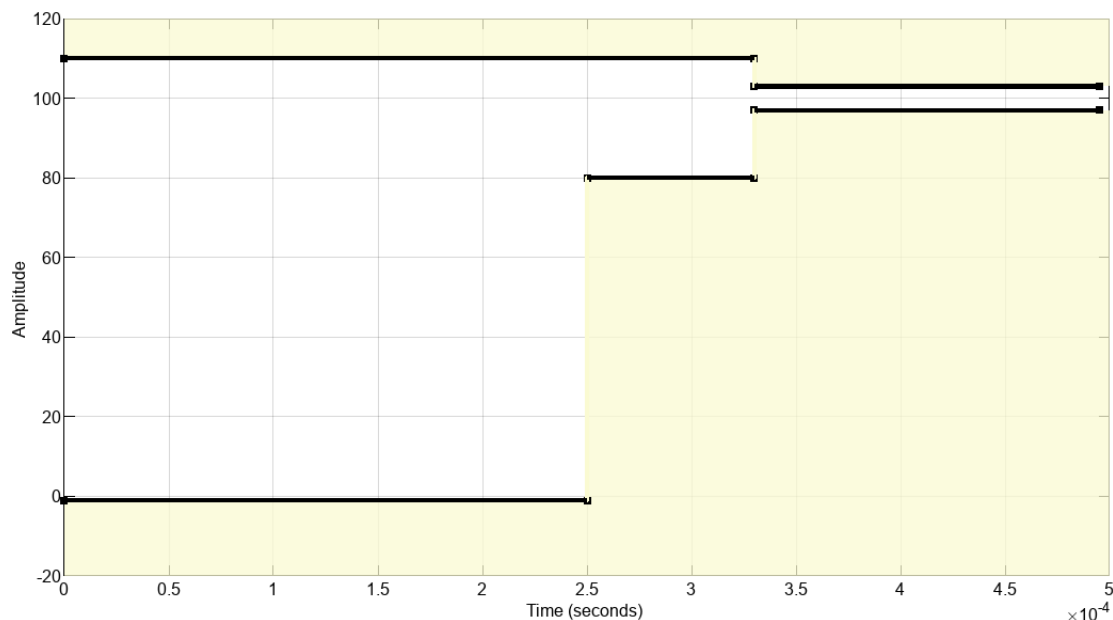


Рисунок 3 – Обмеження перехідного процесу

В результаті оптимізації було отримано значення коефіцієнтів ПІД-регулятора $K_P = 363.1$; $K_I = 11892 \cdot 10^6$; $K_D = 0$. Перехідний процес зображено на рисунку 4, він відповідає зазначеним вище вимогам.

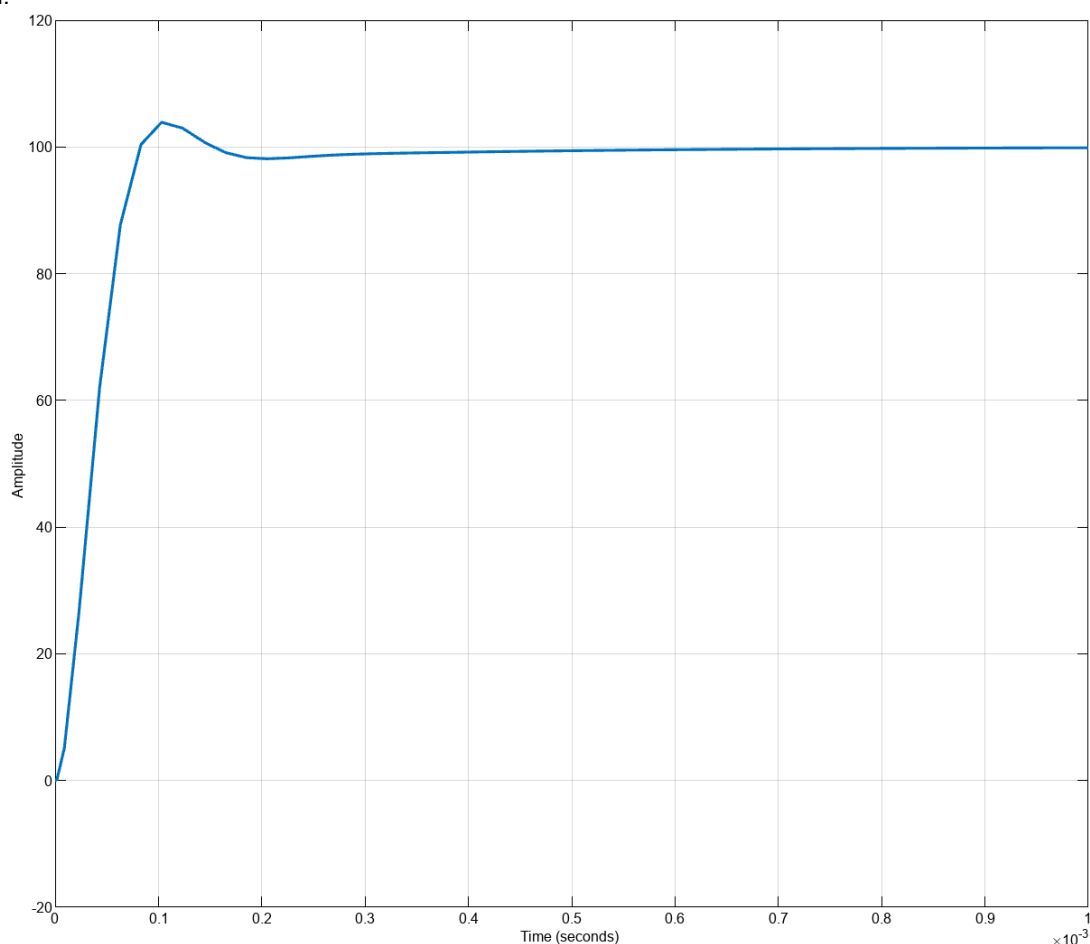


Рисунок 4 – Оптимізований перехідний процес

Висновки. Використання імітаційних моделей і числової оптимізації для синтезу системи керування ІП ДЖПС спрощує процес синтезу, оскільки не вимагає визначення передаточних функцій. Напрямами подальших досліджень можуть бути вдосконалення моделей шляхом врахування нелінійних процесів роботи напівпровідникових приладів, врахування елементів, які забезпечують м'яку комутацію напівпровідникових приладів (ZVS) і перехід до дискретних імітаційних моделей ДЖПС.

Список використаних джерел

1. Vereshchago E. Digital Control System of a Pulsed Power Supply for the Plasmatron / E. Vereshchago, V. Kostiuchenko, S. Novogretskyi //2023 IEEE 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System. – Kremenchuk : KNU, 2023. – P. 30–34. <https://doi.org/10.1109/MEES61502.2023.10402495>
2. Верещаго, Є. М. Цифрова система керування імпульсного пристрою електроживлення плазматрону = Digital control system of a pulsed power supply for the plasmatron / Є. М. Верещаго, В. І. Костюченко, С. М. Новогрецький // Матеріали XIV міжнар. наук.-техн. конф. "Інновації в суднобудуванні та океанотехніці". – Миколаїв : НУК, 2023. – С. 363–368.
3. Верещаго Є. М. Цифрове керування імпульсними джерелами живлення для плазматронів: синтез та оптимізація. / Є. М. Верещаго, Є. В. Стогнієнко, В. С. Маслик, А. П. Єременко // Автоматика та електротехніка : матеріали всеукр. наук-техн. конф. студ., асп. та молодих вчених / відп. за вип. О. О. Пальчиков. – Миколаїв : НУК, 2024. – С. 59–62.
4. Верещаго Є. М. Створення нейро-нечіткого контролера для керування джерелом живлення / Є. М. Верещаго, Є. В. Стогнієнко, О. В. Зівенко, А. П. Єременко // Сучасні проблеми автоматики та електротехніки: Матеріали всеукраїнської науково-технічної конференції. – Миколаїв: НУК, 2024. – С. 52–59.
5. Deli J. An intelligent control strategy for plasma arc cutting technology/ J. Deli, Y. Bo // Journal of Manufacturing Processes. – 2011. – Vol. 13, no. 1. – P. 1-7.
6. Верещаго Є. М. Моделювання імпульсного джерела живлення для електроплазмових технологій / Є. М. Верещаго, М. В. Джангиров, А. П. Єременко // Автоматика та електротехніка : матеріали всеукр. наук-техн. конф. студ., асп. та молодих вчених / відп. за вип. О. О. Пальчиков. – Миколаїв : НУК, 2024. – С. 5–7.
7. MATLAB 2024b. Simulink Design Optimisation User's Guide. – The MathWorks, Inc, 2024. – 1016 p.
8. MATLAB 2024b. Simulink Control Design User's Guide. – The MathWorks, Inc, 2024. – 2954 p.

УДК 621.381.2

Горбов В.Ю., аспірант

Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, м. Миколаїв

ПІДХІД ДО ГЕНЕРАЦІЇ ОПТИМАЛЬНОЇ ТРАЄКТОРІЇ ДЛЯ РУХУ КВАДРОКОПТЕРА

Квадрокоптери широко застосовуються в різних галузях діяльності людини: для задач моніторингу, інспекції, картографування, в військовій сфері та рятувальних операціях. Успішне виконання цих завдань значною мірою залежить від точності та оптимальності траєкторії руху безпілотного літального апарату. При цьому важливо забезпечити не лише економію енергоресурсів і високу точність руху, а й здатність до маневрування в умовах перешкод та непередбачуваних зовнішніх збурень. Задача генерації оптимальної траєкторії для руху квадрокоптера є актуальною та вимагає аналізу та систематизації існуючих методів і пошуку нових ефективних рішень.

Метою роботи здійснення аналізу сучасних підходів до генерації оптимальної тривимірної траєкторії, виявлення суттєвих недоліків, проблем застосування, обмежень існуючих методів та окреслення шляхів подальших досліджень з метою підвищення ефективності керування квадрокоптером в складних умовах експлуатації.

Задача генерації оптимальної траєкторії для руху квадрокоптера полягає в потребі формування такої траєкторії для кожної координати квадрокоптера $[x(t), y(t), z(t), \varphi(t), \theta(t), \psi(t)]$ та відповідних контролюючих впливів $[\tau_1(t), \dots, \tau_4(t)]$, що початкові та кінцеві умови виконуються з врахуванням всіх обмежень, а функція вартості мінімізована. Типовими функціями вартості виступають мінімум часу, мінімум шляху або мінімум витрат енергії, остання є значно складнішою.

Керуючими впливами на квадрокоптер є швидкості його роторів. Маючи спрощені рівняння динаміки квадрокоптера на кшталт рівняння (1) та застосовуючи обернений підхід [1] можна розрахувати керуючі впливи як функцію кінематики системи.

$$\begin{cases} \ddot{x} = u_1 (\cos \varphi \sin \theta \cos \psi + \sin \varphi \sin \psi) \\ \ddot{y} = u_1 (\sin \varphi \sin \theta \cos \psi - \cos \varphi \sin \psi) \\ \ddot{z} = u_1 (\cos \theta \cos \psi) - g \\ \ddot{\theta} = u_2 l \\ \ddot{\psi} = u_3 l \\ \ddot{\varphi} = u_4 \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{aligned}
 u_1 &= (F_1 + F_2 + F_3 + F_4) / m = T / m \\
 \text{де} \quad u_2 &= (-F_1 - F_2 + F_3 + F_4) / J_1 = T_x / J_1, \text{ а } F_i = D\omega_i^2, \text{ де } D - \text{постійна після спрощення.} \\
 u_3 &= (-F_1 + F_2 + F_3 - F_4) / J_2 = T_y / J_2 \\
 u_4 &= C(F_1 - F_2 + F_3 - F_4) / J_3 = T_z / J_3
 \end{aligned}$$

Рівняння (1) можна представити в оберненій формі:

$$\begin{cases} u_1 = \sqrt{\ddot{x}^2 + \ddot{y}^2 + (g + \ddot{z})^2} \\ u_2 = \ddot{\theta} / l \\ u_3 = \ddot{\psi} / l \\ u_4 = \ddot{\phi} \end{cases} \quad (2)$$

Динамічна поведінка квадрокоптера є складною взаємозалежною системою як показано на рис. 1.

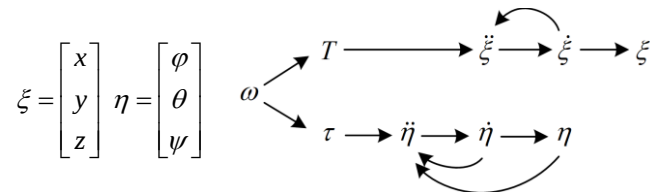


Рисунок 1 – Схема взаємодій між станами, похідними станів та входами керування

Задані контролюючі впливи визначають загальний газ та моменти обертів. Моменти обертів впливають на кутові прискорення залежно від кутів та кутових швидкостей в даний момент. Лінійні прискорення залежать від загального газу, кутів та лінійних швидкостей в даний момент. Кути та координати в просторі можуть бути отримані шляхом інтегрування прискорень. Таким чином рух по бажаній траєкторії в просторі отримується оберненою дією. Маючи повну інформацію про бажаний лінійний рух, знаходяться бажані кути та генеруються необхідні кутові швидкості і прискорення. Ці дані дають змогу розрахувати газ та крутні моменти двигунів, що в свою чергу визначить швидкості обертання пропелерів.

Тобто для контролю руху у просторі зазвичай достатньо сформувати траєкторію для лінійного руху (x у z), а рух обертальний залишити як супровідний. Потім з цих даних формується відповідний керуючий вплив (швидкості роторів). Керування для ристання (yaw) зазвичай або зберігається в нулі, або контролюється окремо, наприклад, для певних завдань де важлива орієнтація або для поліпшення специфічних режимів роботи квадрокоптера, таких як прискорення спуску [2]. Саме слідування згенерованою траєкторією зазвичай виконується за допомогою контролера на основі замкнутого контуру зі зворотнім зв'язком. Загально підхід може виглядати наступним чином, як на рис 2 [3].

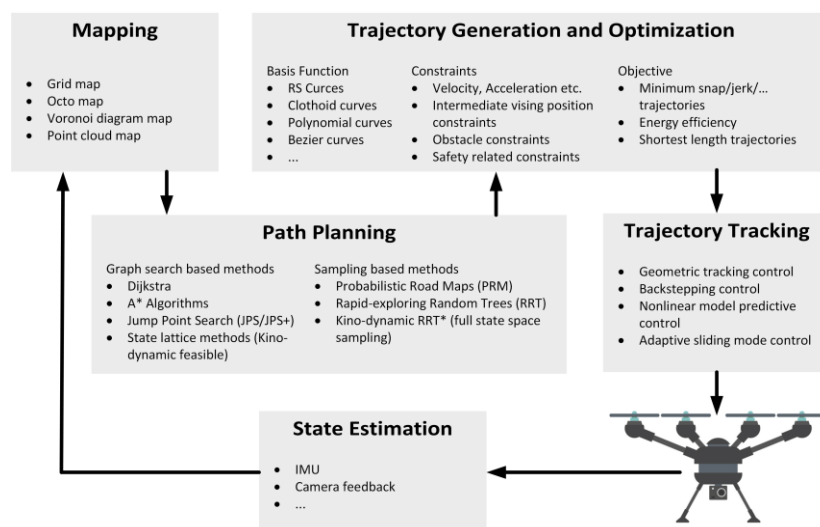


Рисунок 2 – Структура системи планування руху

Геометричний шлях не може бути повністю заданий користувачем з очевидних причин складності. Зазвичай дається зменшена кількість параметрів, наприклад екстремальні точки, можливі проміжні точки, різні обмеження на швидкість прискорення та зазначені швидкості та прискорення в особливих точках, які становлять інтерес. Закон часу руху також зазвичай не задається в кожній точці геометричного шляху, радше стосується загального

часу траєкторії. Тому задача часто переходить в руки алгоритмів для планування руху, які підбирають найменше число контрольних точок маршруту. Ці контрольні точки є вхідними даними для генерації траєкторії.

При генерації траєкторії в декількох просторах важливо синхронізувати координати між просторами відносно найповільнішої або найдовшої з них [4]. Так наприклад алгоритм для максимальної швидкодії [5] виконує маневр не синхронізуючи час координат, а фіксуючи координати в кінцевому положенні поки найповільніша не завершить регулювання, що має ризики неконтрольованого врзання у перешкоди під час руху. На рис. 3 наведено приклад банальної синхронізації за найкоротшою координатою (припускаючи нульові початкові та кінцеві умови для швидкості) та приклад підтримки координати в кінцевому стані без синхронізації.

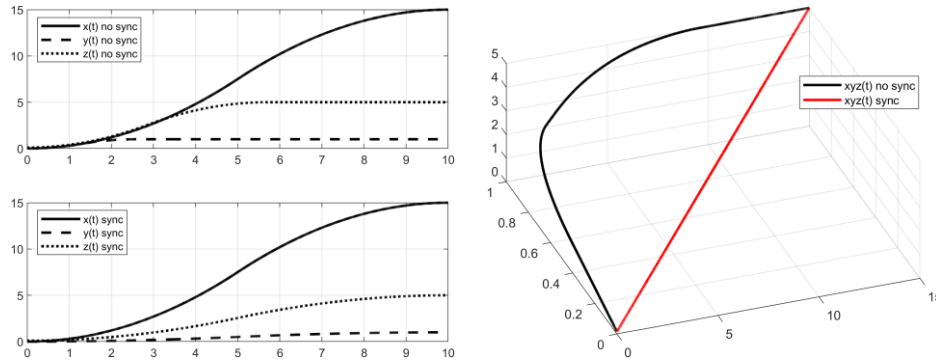


Рисунок 3 – Приклад траєкторії без та з синхронізацією по часу між координатами (з нульовими початковими та кінцевими швидкостями)

Існують різні підходи до формування траєкторій: поліноміальні, тригонометричні, експоненціальні, ті, що основані на розкладанні в ряд Фур'є [4]. В сфері керування квадрокоптерами більш популярними є поліноміальні траєкторії, такі як параболічні траєкторії (з постійним прискоренням), кубічні та з більшим порядком.

Справжня багатопросторова синхронізація з нетривіальною безперервністю швидкості між точками маршруту (багатосегментний маршрут) вимагає додаткової логіки для зіставлення кінцевих швидкостей одного сегмента з початковими швидкостями наступного або їх розв'язання як вільних змінних [6]. Інша проблема синхронізації з неперервною швидкістю полягає у необхідності підлаштовувати загальний час або час сегментів, щоб траєкторія відповідала критеріям обмежень простору, як показано на рис. 4, але зменшуючи час керування збільшується навантаження на керуючий вплив, так як швидкість та прискорення збільшуються [7, 3].

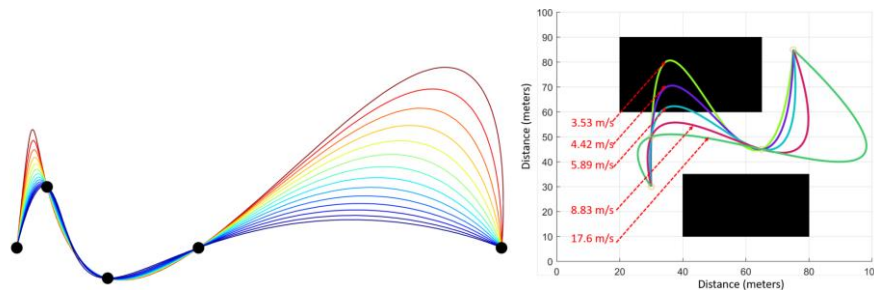


Рисунок 4 – Ілюстрація ітераційного удосконалення часу сегментів

У сфері управління квадрокоптерами, генерація траєкторій з урахуванням високих похідних – таких як прискорення (Acceleration), ривок (jerk) та снап (snap) є ефективним підходом для забезпечення плавного та динамічно допустимого руху. В останні роки представлено інноваційні методи такі як Acceleration / Jerk / Snap Bounded та minimim Acceleration / Jerk / Snap траєкторії [8, 9, 10]. Перша група дозволяє враховувати обмеження на максимальні значення похідних, тоді як друга мінімізує інтеграл квадрату відповідної похідної вздовж траєкторії, що забезпечує плавність руху, що знижує знос деталей та енергоспоживання через зменшення різких змін у динаміці польоту, та безперервність до певного порядку (наприклад траєкторія 7-го порядку може забезпечити безперервність до четвертої похідної), що є важливим для агресивних маневрів.

Якщо на цьому етапі траєкторія задовольняє обмеженням максимальної швидкості та прискоренням (або інше), то вона йде в формування контролюючих впливів, тобто роботи роторів, які теж можливо перевіряти на певні обмеження. Якщо траєкторія їм не задовольняє або має певний запас, то ітераційним методом або іншим алгоритмом, час підлаштовується під межі оптимальності в задачі мінімуму часу. В задачі ж мінімальних енерговитрат вводяться рівняння для електрофізичних процесів батареї, контролера обертів дрону та нетривіальні функція вартості.

Висновки. Показаний сучасний підхід до формування оптимальних траєкторій руху квадрокоптеру проаналізовано методи генерації просторових траєкторій. Показані недоліки та підкреслені виклики для формування багатосегментної траєкторії з неперервною швидкістю, необхідність побудови спеціального алгоритму контролю неперервності швидкості (та/або вищих похідних) при багатопросторової синхронізації для складних режимів польоту квадрокоптера.

Список використаних джерел

1. Teppo Lukkonen, "Modeling and Control of Quadcopter", School of Science, Aalto University, 2011
2. A. Talaeizadeh, H. N. Pishkenari and A. Alasty, "Quadcopter Fast Pure Descent Maneuver Avoiding Vortex Ring State Using Yaw-Rate Control Scheme," in IEEE Robotics and Automation Letters, vol. 6, no. 2, pp. 927-934, April 2021
3. Arshad, M. A., Ahmed, J., & Bang, H. (2023). Quadrotor Path Planning and Polynomial Trajectory Generation Using Quadratic Programming for Indoor Environments. Drones, 7(2), 122
4. Biagiotti, Luigi & Melchiorri, Claudio. (2008). Trajectory Planning for Automatic Machines and Robots. 10.1007/978-3-540-85629-0
5. V.L. Timchenko, D.O. Lebedev, "12 Algorithmic Procedures Synthesis of Robust-Optimal Control for Moving Objects," in Recent Developments in Automatic Control Systems, River Publishers, 2022, pp.289-324.
6. Foehn, Philipp & Romero, Angel & Scaramuzza, Davide. (2021). Time-optimal planning for quadrotor waypoint flight. Science robotics. 6. 10.1126/scirobotics.abh1221.
7. Richter, Charles & Bry, Adam & Roy, Nicholas. (2016). Polynomial Trajectory Planning for Aggressive Quadrotor Flight in Dense Indoor Environments. 10.1007/978-3-319-28872-7_37.
8. E. Tal and S. Karaman, "Accurate Tracking of Aggressive Quadrotor Trajectories Using Incremental Nonlinear Dynamic Inversion and Differential Flatness," in IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 29, no. 3, pp. 1203-1218, May 2021
9. Mellinger, Daniel & Kumar, Vijay. (2011). Minimum snap trajectory generation and control for quadrotors. 2520 - 2525. 10.1109/ICRA.2011.5980409.
10. Qin, Chaojun & Zhao, Na & Wang, Qiuyu & Luo, Yudong & Shen, Yantao. (2025). Minimum Snap Trajectory Planning and Augmented MPC for Morphing Quadrotor Navigation in Confined Spaces. Drones. 9. 304. 10.3390/drones9040304.

УДК 004.712

Топалов А.М., к.т.н., доцент

Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, м. Миколаїв

СТРУКТУРИ ТА ЗАСОБИ БЕЗПЕКИ БЕЗПРОВОДНИХ МЕРЕЖ WI-FI В ЗАДАЧАХ АВТОМАТИЗАЦІЇ

У сучасних системах автоматизації безпроводні мережі Wi-Fi відіграють важливу роль, забезпечуючи надійну передачу даних між різними пристроями без використання дротових з'єднань. Існують різні структури Wi-Fi мереж, які використовуються залежно від завдань, масштабу мережі та вимог до її надійності та продуктивності. Для побудови мереж бездротового доступу інженери користуються мережевими топологіями, кожен з яких адаптують під середовище.

Перша специфікація стандарту IEEE 802.11 була прийнята у 1997 році. Вона встановила передачу даних на швидкостях 1 і 2 Мбіт/с у неліцензійному діапазоні частот 2,4 ГГц, а також визначила механізм управління доступом до фізичного середовища (радіоканалу) з використанням методу множинного доступу з розпізнаванням несучої і усуненням колізій (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance, CSMA-CA). У таблиці 1 представлені ключові технічні характеристики основних стандартів IEEE 802.11.

Технологія Wi-Fi, або Radio Ethernet IEEE 802.11, є першим промисловим стандартом, який дозволив організувати бездротову локальну мережу (Wireless Local Area Networks — WLAN) на обмеженій території, тобто коли кілька користувачів мають рівний доступ до загального каналу передачі даних [1]. Створений в Інженерному інституті електротехніки та радіоелектроніки (Institute of Electrical and Electronics Engineers — IEEE), цей стандарт за своїми можливостями може зрівнятися зі стандартом 802.3 для традиційних дротових Ethernet-мереж. Центральним елементом бездротової мережі Wi-Fi є точка доступу (Access Point), яка може підключатися до будь-якої наземної мережевої інфраструктури, наприклад, до Ethernet-мережі, та забезпечувати передачу радіосигналу [2, 3].

Завдяки широкому поширенню і постійному розвитку стандарту, на сьогоднішній день розроблено безліч його версій із відповідними літерними індексами: a, b, c, d, e, g, h, i, j, k, l, m, n, o, p, q, r, s, u, v, w. Однак лише чотири з них (a, b, g і n) стали найбільш поширеними та популярними серед виробників обладнання, тоді як інші є удосконаленнями, доповненнями або виправленнями вже прийнятих специфікацій.

Таблиця 1 - Ключові характеристики основних стандартів IEEE 802.11

Стандарт	IEEE 802.11a	IEEE 802.11b	IEEE 802.11g	IEEE 802.11n
Рік ратифікації Wi-Fi альянсом	1999	1999	2003	2009
Частотний діапазон, ГГц	5.15-5.24 5.67-5.85	2.4-2.482	2.4-2.483	2.4-2.481 5.14-5.25 5.67-5.85
Доступ до радіоканалу	CSMA-CA	CSMA-CA	CSMA-CA	CSMA-CA
Кількість абонентів на один канал	64	64	64	64
Максимальна швидкість обміну даними	54 Мбіт/с	11 Мбіт/с	54 Мбіт/с	600 Мбіт/с
Звичайна швидкість передачі даних	23 Мбіт/с	1 Мбіт/с	20 Мбіт/с	120 Мбіт/с
Ширина каналу	20 МГц	22 МГц	20 МГц	40 МГц
Метод модуляції	OFDM	BPSK, CCK	OFDM	BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM
Дальність дії в приміщенні	10-20	20-100	20-50	10-20

Розглядаючи більш детально сфери застосування технології бездротової передачі даних Wi-Fi, можна відзначити, що сьогодні вона використовується в багатьох областях діяльності. Технологія отримала розвиток в задачах автоматизації, оскільки це дозволяє відмовитися від десятків кілометрів проводів. Нижче наведені деякі структури Wi-Fi мереж, що можуть бути задіяні в автоматизації.

Інфраструктурна топологія. Така мережа забезпечена базовим набором послуг (BSS). Всі станції, що підключені до точки доступу, утворюють базовий сервісний набір. Також існує ще базова зона обслуговування (BSA). Основна зона обслуговування - це зона, яка охоплена точкою доступу. Сигнал точки доступу може виходити за межі діапазону підключених до нього пристроїв. Ця зона покриття – являється BSA.

Ad Hoc. Режим Ad Hoc являється самодостатньою мережею Peer-to-Peer. Тобто, це мережа без точки доступу, в якій пристрої не тільки являються кінцевими точками, а й маршрутизаторами.

Wireless Mesh. Мережа, що представляє собою взаємозв'язок підключених вузлів, які утворюють самостійну мережу. Якщо один вузол мережі «падає», то формується новий шлях для створення мережі, що працює. Сітчасті вузли використовують стандарти 802.11, щоб спілкуватись один з одним. Резервний сітчастий вузол також може бути налаштований для підключення до загальнодоступного шлюзу. До будь-якого мережевого вузла можуть бути підключені користувачі. Навантаження на мережевий трафік потрібно збалансувати між різними вузлами та створити ефективні механізми маршрутизації, щоб забезпечити найшвидший шлях до загальнодоступної мережі.

P2P. Це мережа Peer-to-Peer в якій одна бездротова станція виконує роботу бездротової головної станції. Головна станція розсилає маяки і відповідає за підтримку мережі Peer to Peer. Інші бездротові станції підключаються до власника групи. Клієнтську станцію називають груповими клієнтами. Коли власник групи покидає мережу, клієнт групи приймає роль власника групи. Пристрій власника групи також може одночасно приєднатися як пристрій групового клієнта до іншої мережі P2P, якщо він підтримує кілька радіостанцій 802.11.

Оскільки безпеці бездротових мереж на промисловості і в автоматизації варто приділяти особливу увагу, розглянемо способи захисту мереж [4, 5], визначивши їх особливості в залежності від технології.

Почнемо з протоколу WEP, який використовує 64-, 128-, 256- і 512-бітне шифрування. Вища стійкість мережі до злому забезпечується збільшенням кількості біт для зберігання ключа, що відповідно підвищує кількість можливих комбінацій. Ключ WEP складається зі статичної частини (перші 40 біт у випадку 64-бітного шифрування) і динамічної частини — вектора ініціалізації обсягом 24 біти, який змінюється під час роботи мережі. Таким чином, для злому необхідно зібрати повтори вектора ініціалізації та врахувати статичну частину ключа. Враховуючи недоліки WEP, сьогодні рекомендується використовувати більш сучасні стандарти або підсилювати WEP додатковими механізмами захисту.

Наступним етапом розвитку став протокол TKIP (Temporal Key Integrity Protocol), який запроваджує динамічне оновлення ключів мережі. Кожному пристрою призначається власний ключ, який змінюється досить часто, що ускладнює несанкціонований доступ.

Для забезпечення цілісності даних використовується протокол MIC (Message Integrity Check). Він захищає пакети від перехоплення та модифікації, а також бере участь у забезпеченні цілісності при зміні напрямку передачі даних.

Подальшим розвитком бездротової безпеки став протокол WPA, який представлений кількома варіантами. WPA-PSK (Pre-Shared Key) передбачає використання ключової фрази для генерації мережевих ключів і автентифікації, що оптимально підходить для домашніх та невеликих офісних мереж. У свою чергу, WPA-802.1x базується на автентифікації через сервер і є доцільним вибором для великих мереж.

Вдосконаленням WPA став протокол WPA2, у якому замість RC4 використовується набагато стійкіший алгоритм шифрування AES. Аналогічно до WPA, WPA2 ділиться на WPA2-PSK для невеликих мереж і WPA2-802.1x для корпоративних мереж із підвищеними вимогами до безпеки.

Особливу увагу заслуговує стандарт 802.1X, який інтегрує кілька протоколів безпеки: TLS (Transport Layer Security), що забезпечує шифрування й цілісність переданих даних між сервером і клієнтом; EAP (Extensible Authentication Protocol), який використовується для розширеної автентифікації у великих мережах разом із сервером RADIUS; а також сам RADIUS (Remote Authentication Dial-In User Service) — сервер автентифікації користувачів за логіном і паролем.

Ще одним ефективним способом захисту є використання VPN (Virtual Private Network). Ця технологія створює захищені «тунелі» між клієнтом і сервером через загальнодоступні Інтернет-канали, зазвичай із застосуванням протоколу IPSec.

Окрім основних методів, існують також додаткові заходи захисту мережі. Одним із них є заборона доступу до налаштувань точки доступу або роутера через бездротову мережу, що унеможливило б зміну конфігурації через Wi-Fi, хоча сам по собі цей метод не захищає від перехоплення трафіку.

Ще одним засобом є фільтрація за MAC-адресами, що дозволяє обмежити доступ до мережі лише визначеним пристроям. MAC-адреса є унікальним ідентифікатором мережевого пристрою, а перелік дозволених MAC-адрес формується у так званому списку контролю доступу (Access Control List, ACL).

Крім того, для додаткової безпеки можна застосувати приховування SSID — ідентифікатора бездротової мережі. У такому випадку мережа не відображатиметься у стандартних утилітах сканування, наприклад, у Windows, що ускладнює її виявлення.

Варто зазначити, що для підключення до бездротової мережі обов'язковим є знання ESSID точки доступу. Без цього параметра мобільна станція не зможе здійснити підключення до мережі.

Список використаних джерел

1. Сайко В.Г., Казіміренко В.Я., Літвінов Ю.М. Мережі бездротового широкосмугового доступу. Навчальний посібник. – К.: ДУТ, 2015. - 196 с.
2. Абрамов В.О., Клименко С.Ю. Базові технології комп'ютерних мереж: навчальний посібник. - К.: Київ. ун-т ім. Б. Грінченка, 2011. - 291 с.
3. Г. Додонов, Д. В. Ланде, В. Г. Путятін. Інформаційні потоки в глобальних комп'ютерних мережах. — К.: Наук, думка, 2009. - 295 с.
4. Wi-Fi - розвиток і основні принципи найпоширенішого стандарту бездротових мереж. Електронний ресурс, режим доступу: https://ua.gecid.com/netlan/wi-fi-_razvitie_i_osnovnyee_prinipye_samogo_rasprostranennogo_standarta_besprovodnyeh_seteyi/
5. Гарист А.В. Аналіз захищеності Wi-Fi мереж. Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. Том 32 (71) Ч. 1 № 2 2021, С 97-101 с.

СЕКЦІЯ 4. ПЕРЕТВОРЮВАЛЬНА ТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ

УДК 621.317.3

Рябенський В. М. проф., д.т.н, Худякова І.М., к.п.н.

Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, м. Миколаїв

ГЕНЕРАТОР СИНУСОЇДАЛЬНИХ КОЛИВАНЬ З ОДНИМ ЧАСО – ЗАДАЮЧИМ КОНДЕНСАТОРОМ.

Низькочастотні генератори синусоїдальних коливань, що працюють в межах від одиниць Герц до (100 – 200) кГц, знаходять широке використання в різних напрямках електронної техніки. Сюда можна віднести елементи систем електронної автоматики, вимірювальної техніки, акусто електроніки: вони використовуються як лабораторні прилади різного призначення та інше [1,2,3].

Зрозуміло, що і вимоги до таких генераторів досить різноманітні. Головними з них є стабільність частоти, стабільність амплітуди, коефіцієнт гармонік вихідного сигналу, інваріантність до коливань напруги живлення. Для генераторів зі змінною частотою, поряд з вище вказаними, важливими є робочий частотний діапазон, лінійність перетворення керуючого параметру в частоту [1].

Практика побудови низькочастотних генераторів базується на використанні напівмоста Віна. [4]. Але класичні схеми генераторів з його використанням мають досить низькі технічні характеристики і відповідно, низькі характеристики регулювання частоти. В ряді літературних джерел [1,5,6] пропонуються досить ефективні шляхи по їх усуненню, але це забезпечується суттєвим ускладненням таких генераторів, оскільки передбачаються незалежні системи стабілізації тих, чи інших параметрів. Наприклад, для забезпечення дискретної зміни частоти генератора в [5] передбачені цифрові комутатори опорів, що суттєво ускладнює як саму схему, так і вихідні сигнали, оскільки при зміні величин резисторів генератор весь час буде знаходитись в динамічному режимі. Стабілізація амплітуди, яка пропонується окремими авторами [1,7,8,9], приводить до значного ускладнення як самої схеми стабілізації, так і технології налагодження.

В останні роки окремі автори звернулись до розробки і використання низькочастотних генераторів, в яких використовується два операційних підсилювачі і одне часо – задаюче коло [10], але більш – менш детальний аналіз таких генераторів відсутній.

Мета роботи: аналіз роботи генератора синусоїдальних коливань, який побудований з використанням одної часо – задаючої ланки.

В доповіді приводяться результати цього аналізу. Мультисім – модель такого генератора наведена на рис.1.

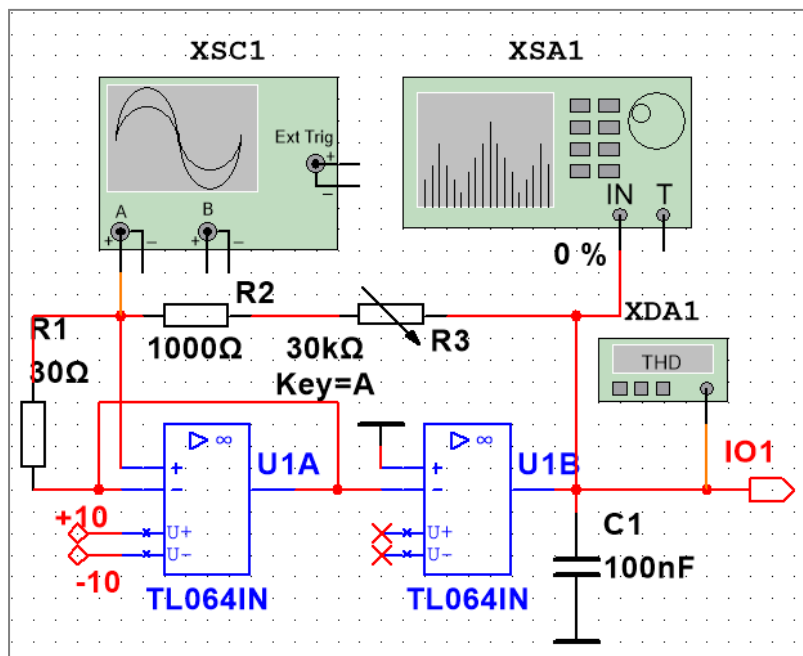


Рисунок 1 – Мультисім – модель генератора синусоїдальних коливань, який побудований з використанням одної часо – задаючої ланки

Два підсилювачі об'єднані в кільце, в якому встановлена часо – задаюча ланка (R2+R3)C1. Резистор R1, що встановлений між прямим і інверсним входами підсилювача U1A, призначений для контролю контурного коефіцієнта підсилення, чим забезпечується «м'яке» збудження генератора. За допомогою R1 можна регулювати величину вихідного сигналу, але при цьому буде зростати величина коефіцієнта гармонік. Досить часто резистор R1 доповнюється послідовно включеним конденсатором.

Головна особливість генератора, на відміну від пристроїв, в яких використовується напівміст Віна – його низька вихідна наруга. амплітуда якої знаходиться в межах 2 В. Ця особливість суттєво обмежує можливості підвищення коефіцієнта гармонік вихідного синусоїдального сигналу. В генераторах з використанням напівмоста Віна використовуються різні схеми покращення якості вихідного сигналу, амплітуди якого досягають 10 В. В процесі моделювання в Мультисім схеми, що розглядається, можливо лише при умові точної установки першої гармоніки частоти вихідного сигналу генератора. При відсутності моделі пристрою для вимірювання частоти задача розв'язувалась за допомогою спектроаналізатора XSA1 (Рис 2) і паралельно з допомогою осцилографа (Рис.3), а також за допомогою спектрального аналізу сигналу (Рис.4). Отриманий результат встановлювався в Distortion Analyser XDA1 за допомогою якого і визначається коефіцієнт гармонік (THD). Проведені дослідження для ряду значень параметрів часо задаючої ланки і резистора R1, яким змінювалась амплітуда коливань, встановлено, що значення $THD < 8\%$ отримати практично не можливо. Звідси витікає, що наведена схема генератора не може бути використана в дослідженнях аудіотехніки.

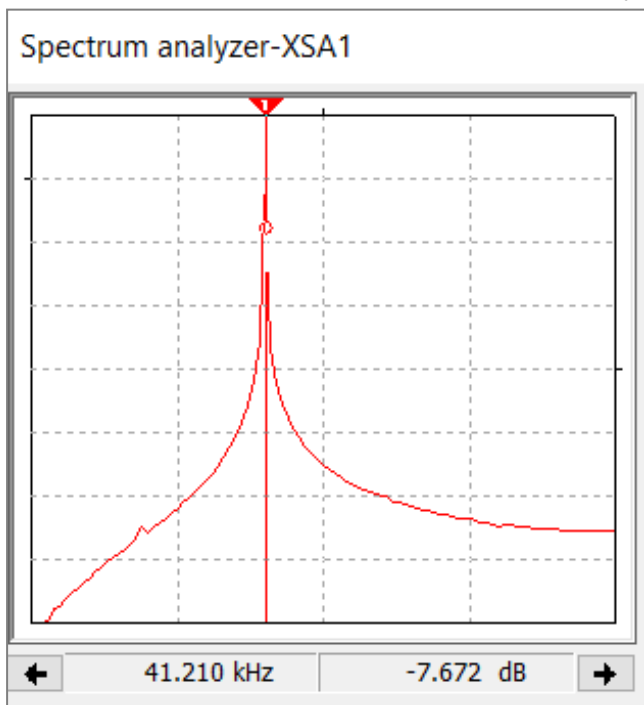


Рисунок 2 – Вимірювання частоти за допомогою спектроаналізатора XSA1

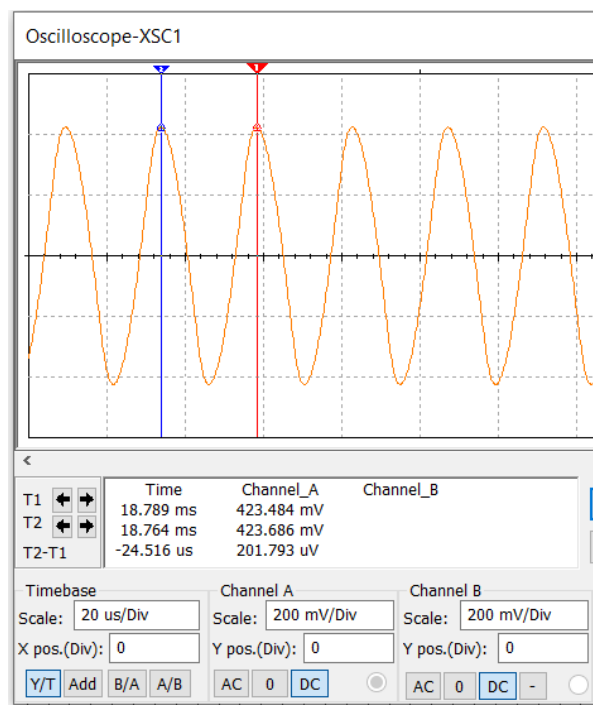


Рисунок – 3. Вимірювання частоти з допомогою осцилографа

Стабільність частоти встановити з високою ступіню точності при модельних дослідженнях не можливо. В той же час, аналіз роботи генератора на різних частотах з допомогою спектроаналізатора XSA1 встановив відсутність коливань частоти і їх незначні відхилення (в межах 0.0008%) при зміні параметрів конденсатора в межах 10%. Допоміжно контроль стабільності частоти досліджувався за допомогою частного детектора з добротністю коливального контура біля 20 одиниць. Цей дослід підтвердив порівняно високу стабільність частоти генератора, що засвідчує той факт, що він може бути використаний при дослідженні частотних властивостей полосових та вибіркокових низькочастотних фільтрів

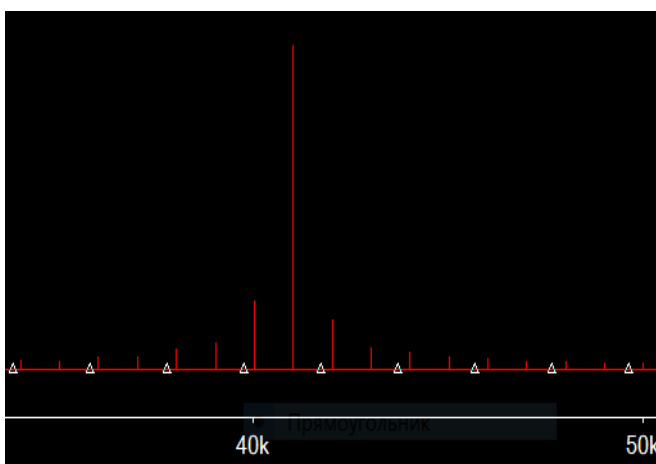


Рисунок – 4. Вимірювання частоти з допомогою спектроаналізатора XSA1

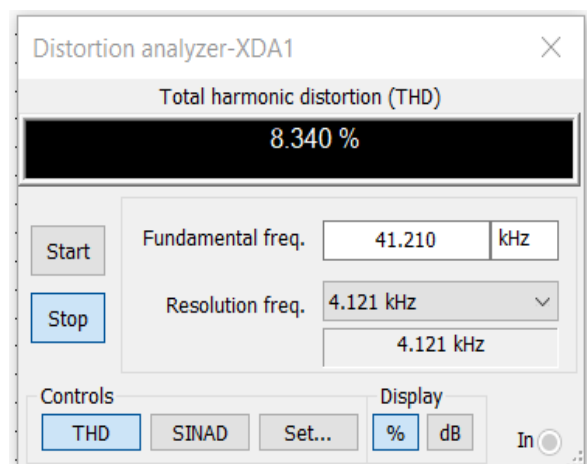


Рисунок – 5. Distortion Analyser XDA1

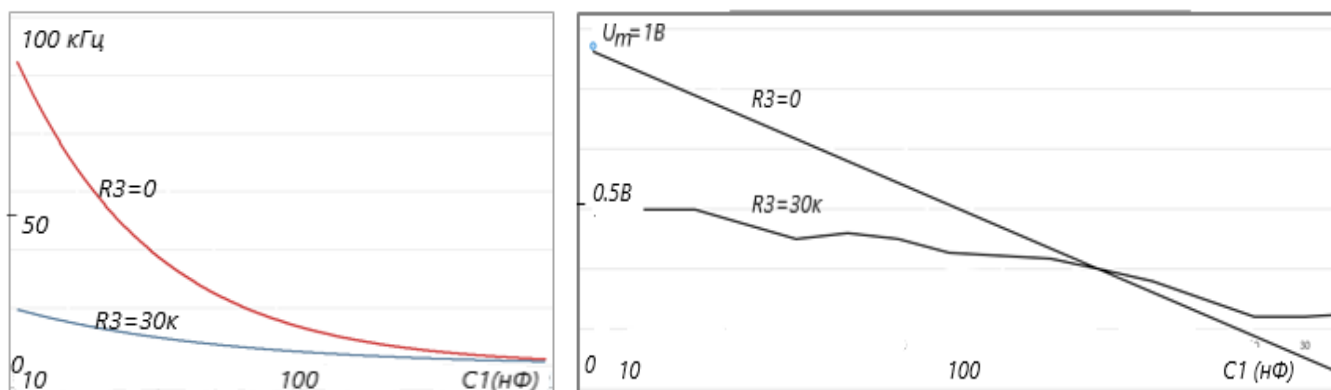


Рисунок – 6. Залежності, що характеризують роботу генератора при зміні параметрів часо задаючої ланки.

На Рис.6 наведені залежності, що характеризують роботу генератора при зміні параметрів часо задаючої ланки. при вказаних на схемі параметрах резисторів генератор починає працювати при мінімальній ємності конденсатора $C1 = 6$ нФ. Подальше збільшення величини ємності конденсатора приводить до зменшення робочої частоти і, відповідно, частотного діапазону регулювання (Рис 6). Максимальний діапазон регулювання частоти від 100 кГц до 10 кГц має місце при ємності $C1 = 10$ нФ., який швидко зменшується при зростанні установленної ємності до 200 нФ. Майже аналогічно зменшується і величина амплітуди вихідного сигналу. При величині ємності конденсатора від 500 нФ і вище амплітуда вихідного сигналу не перевищує декількох десятків мВ. При цьому одночасно з зменшенням амплітуди зменшується і стабільність вихідної напруги. При зміні напруги живлення операційних підсилювачів від 15 В до 5 В вихідна напруга генератора пропорційно зменшилась від 1 до 0.03 В

Висновки.

1. Низькочастотні генератори з одною часо задаючою ланкою мають досить обмежені по амплітуді і частоті параметри вихідного сигналу, що суттєво обмежує можливості його використання.
2. Такі генератори в наслідок високої простоти схеми і стабільності частоти вихідного сигналу можуть знайти використання в лабораторних стендах або радіолюбительській практиці для дослідження і налагодження полосових, або вибіркокових фільтрів низьких частот.

Список використаних джерел

1. Sinewave Oscillators - Characteristics, Topologies and Examples/ <https://sound-au.com/articles/sinewave.htm#s7>
2. Sweep generator with marker. <https://www.rlotsman.ru/shem/pdf.html?di=176599>
3. High Frequency Oscillator Based on Current Feedback Operational Amplifier. <https://www.rlotsman.ru/shem/pdf.html?di=183293>
4. Тітце У., Шенк К. Напівпровідникова схемотехніка. Вид. Мир, 1982.
5. Thomas Brand .How to Build Programmable Oscillators Using Digital Potentiometers <https://www.radiolocman.com/review/article.html?di=654879>
6. Ultra-low distortion sinewave oscillator. Part 2. <https://www.rlotsman.ru/shem/pdf.html?di=658679>
7. "Wien-bridge Oscillator With Low Harmonic Distortion" - John Linsley-Hood (Wireless World, May 1981)
8. Sine Wave Oscillators, Ron Mancini and Richard Palmer (SLOA087, Texas Instruments)
9. 10 A Quick Sine Wave Generator (SNOA839, Texas Instruments)
10. Single capacitor sine-wave RC-oscillators. <https://www.rlocman.ru/shem/schematics.html>

УДК 537.5

Буряк В.С., ст. викл.

Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, м. Миколаїв

МОДЕЛЮВАННЯ ВИСОКОЯКІСНОГО ДЖЕРЕЛА НАПРУГИ НА БАЗІ МІКРОСХЕМИ TL431

Висока якість електричної напруги є важливим аспектом в електроенергетиці, який впливає на надійність та ефективність роботи електричних систем та електрообладнання. Ось декілька ключових аспектів його значення:

1. **Надійність роботи обладнання:** Висока якість напруги забезпечує стабільну роботу електричних пристроїв.
2. **Енергоефективність:** Стабільна і якісна напруга сприяє більш ефективному використанню електроенергії. Це допомагає знизити втрати енергії та покращити загальну продуктивність системи.

3. *Зниження електромагнітних перешкод*: Якість напруги також пов'язана з рівнем електромагнітних перешкод, які можуть негативно впливати на чутливе обладнання. Висока якість напруги допомагає мінімізувати такі перешкоди.

4. *Стійкість до зовнішніх впливів*: Висока якість напруги дозволяє системам краще справлятися з коливаннями навантаження та зовнішніми факторами, такими як погодні умови або аварії в мережі.

5. *Безпека*: Низька якість напруги може призвести до перегріву проводки та обладнання, що збільшує ризик виникнення коротких замикань та пожеж. Підтримка високої якості напруги допомагає запобігти таким інцидентам.

Метою роботи є моделювання роботи джерела живлення на базі мікросхеми TL431.

Електронний компонент TL431 широко використовується у комп'ютерних блоках живлення, телевізорах та іншій побутовій техніці як прецизійне програмоване джерело опорної напруги. Особливістю цієї мікросхеми є те, що вона виконує функції стабілітрона. Мікросхема складається з наступних елементів: корпусу, операційного підсилювача (ОП), вихідного транзистора, а також джерела опорної напруги на 2.5 В, яке має високу стабільність. У коло джерела опорної напруги також включений кремнієвий діод, який призначений для запобігання утворенню зворотного струму та захищає від переполюсування.

Схему найпростішого джерела напруги на базі мікросхеми TL431 наведено рис. 1.

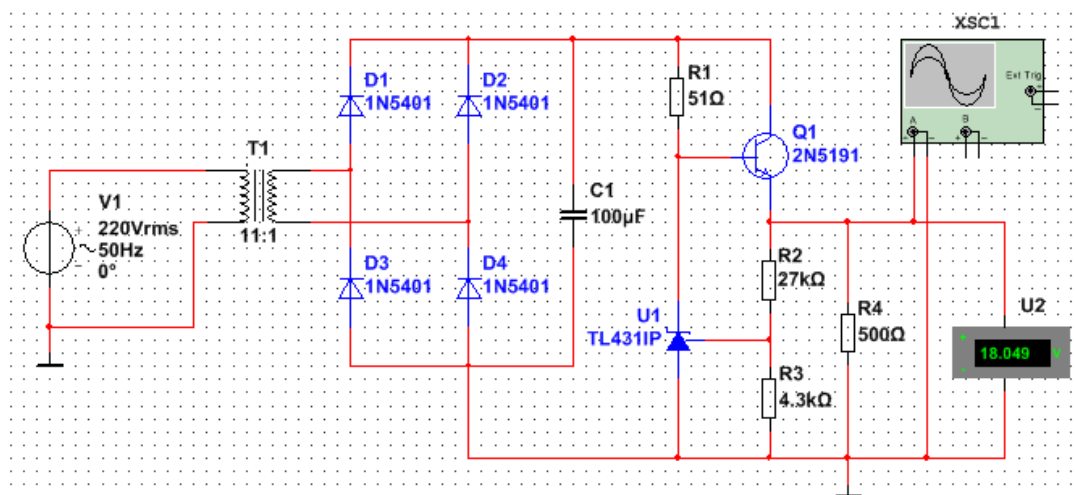


Рисунок 1 – Найпростіше джерело напруги на базі мікросхеми TL431

Якщо резистор R2 замінити потенціометром, отримаємо регульоване джерело напруги. Недоліком схеми джерела живлення, наведеної на рис. 1, є невелика навантажувальна здатність. При великих струмах і високих напругах струм крізь мікросхему U1 може перевищити гранично допустимий.

Для збільшення навантажувальної здатності замість транзистора Q1 можна застосувати складовий транзистор. Але більш доцільним є використання складового емітерного повторювача на комплементарних транзисторах Q1 та Q2, як показано на рис. 2, адже він забезпечує менше падіння напруги.

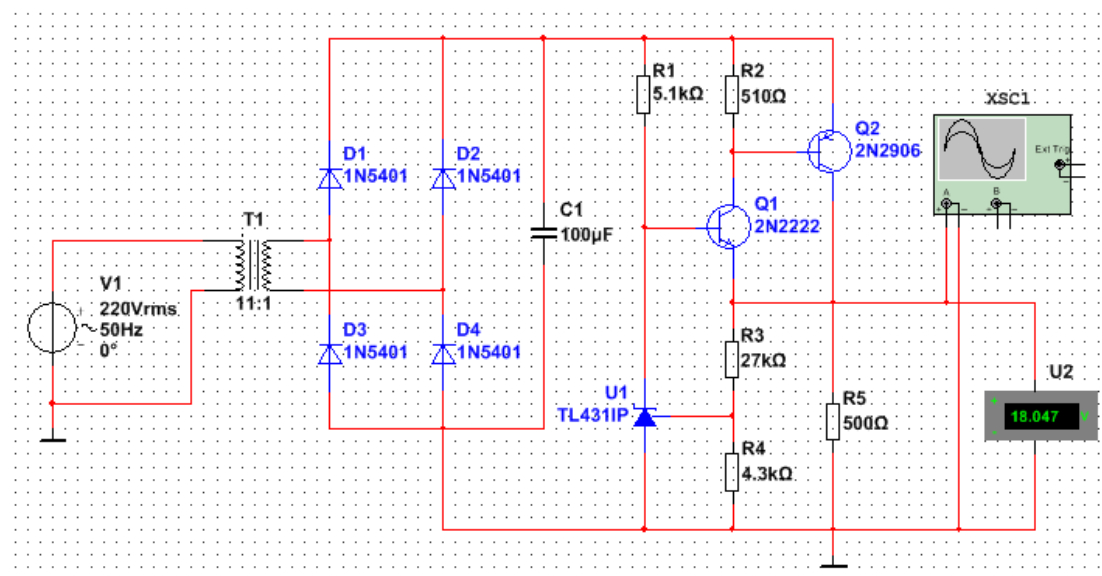


Рисунок 2 – Джерело напруги на базі мікросхеми TL431 зі складеним емітерним повторювачем на комплементарних транзисторах

Замість біполярного транзистора Q2 можна використати польовий транзистор відповідно до схеми, показаної на рис. 3.

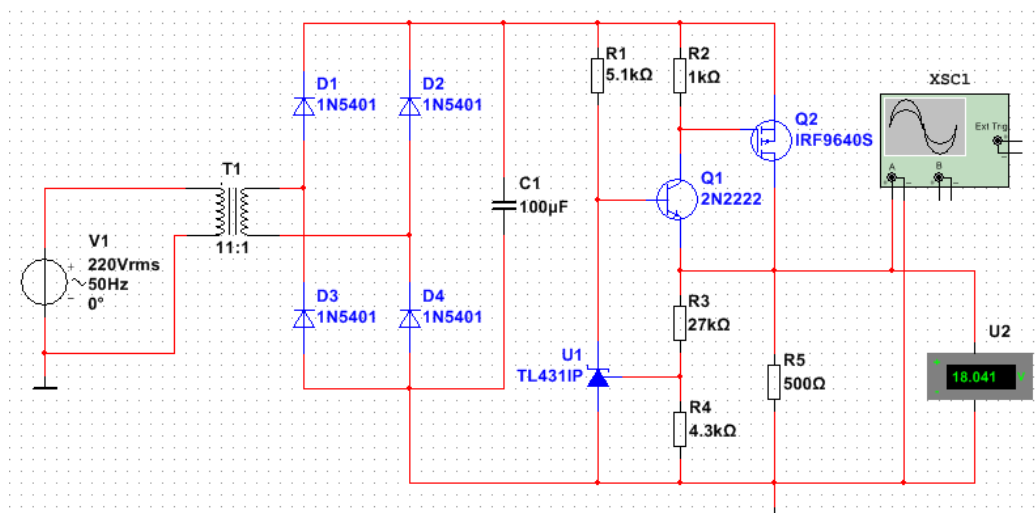


Рисунок 3 – Джерело напруги на базі мікросхеми TL431 зі складеним емітерним повторювачем на біполярному та польовому транзисторах

Схема з польовим транзистором має перевагу, оскільки асортимент потужних польових транзисторів з р-каналом значно більший, ніж біполярних р-п-р транзисторів. Дослідимо цю схему більш детально.

На рис. 4 представлена осцилограма вихідної напруги, яка була знята з навантажувального резистора R5 за допомогою осцилографа XSC1. Як бачимо, за проміжок часу 3.504 мс після підключення до мережі живлення ~220 В / 50 Гц вихідна напруга зростає від 0 до 18 В і потім підтримується незмінною.

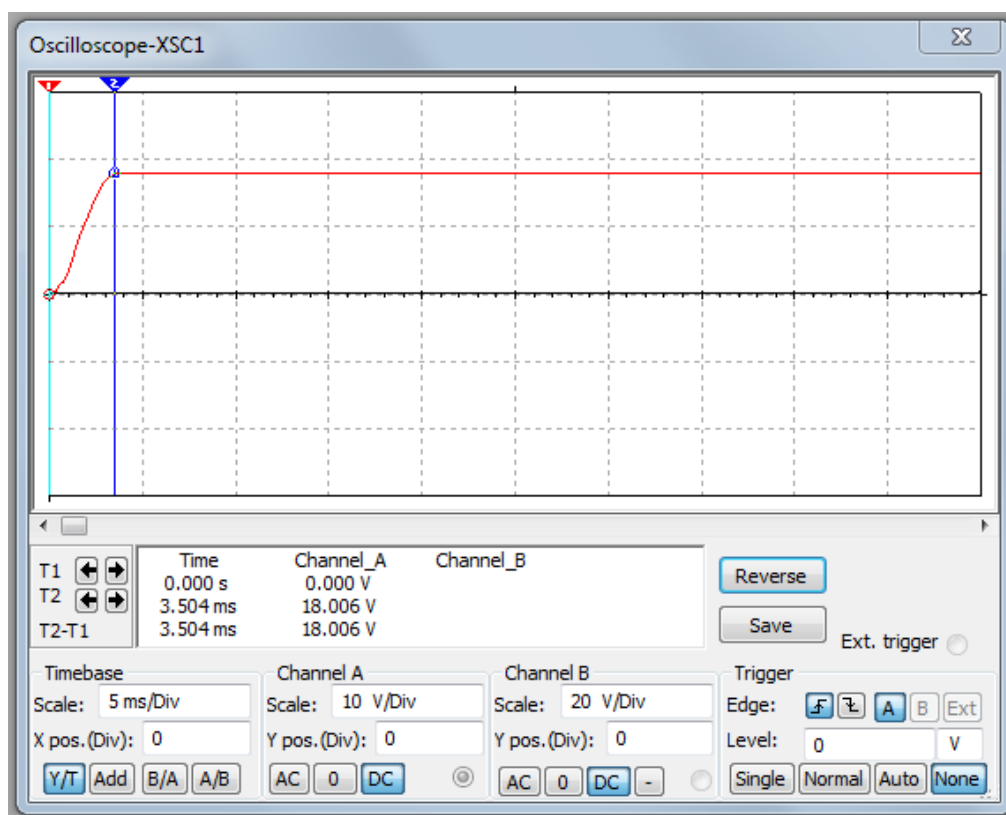


Рисунок 4 – Осцилограма вихідної напруги для джерела живлення, схему якого наведено на рис. 3

Здійснимо еквівалентну заміну вхідної частини схеми, яка забезпечує випрямлення та фільтрування мережевої напруги ~220 В / 50 Гц, на джерело постійної напруги 25 В (рис. 5) і виконаємо деякі параметричні моделювання. Результати цих моделювань представлені на рис. 6, рис. 7, рис. 8.

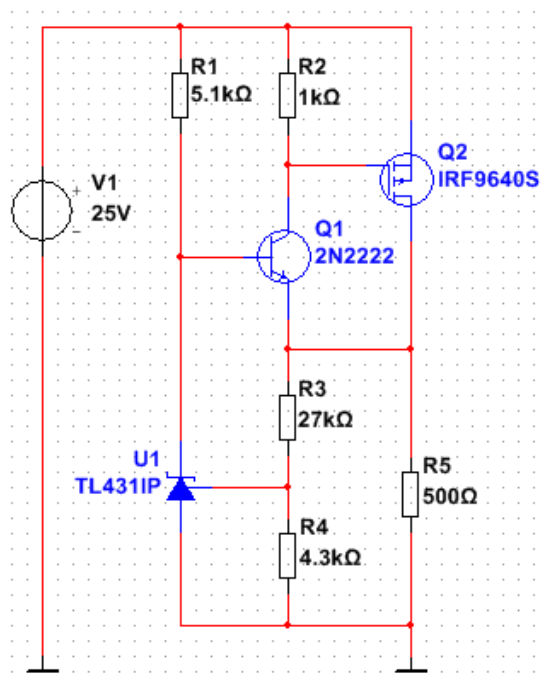


Рисунок 5 – Еквівалентна схема із заміною вхідної частини на джерело постійного напруги 25 В

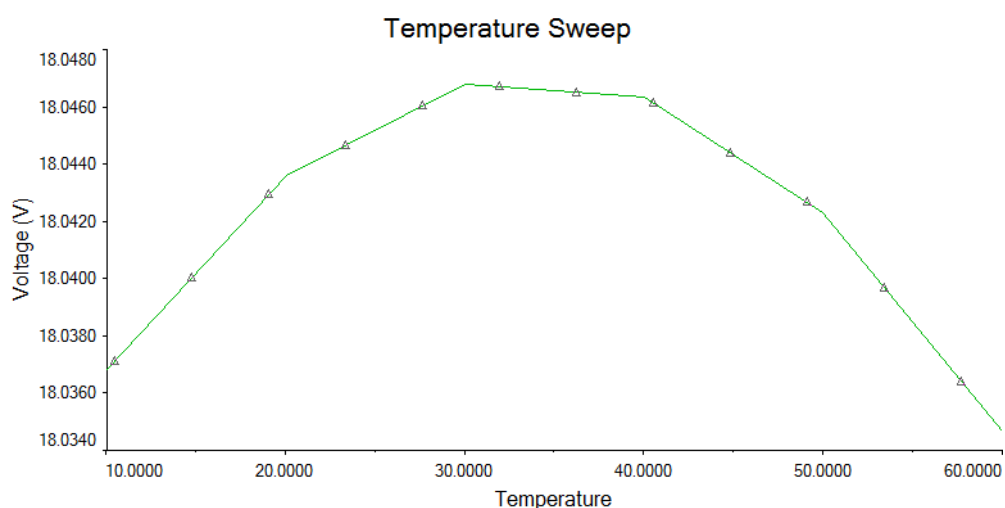


Рисунок 6 – Температурна залежність вихідної напруги джерела живлення

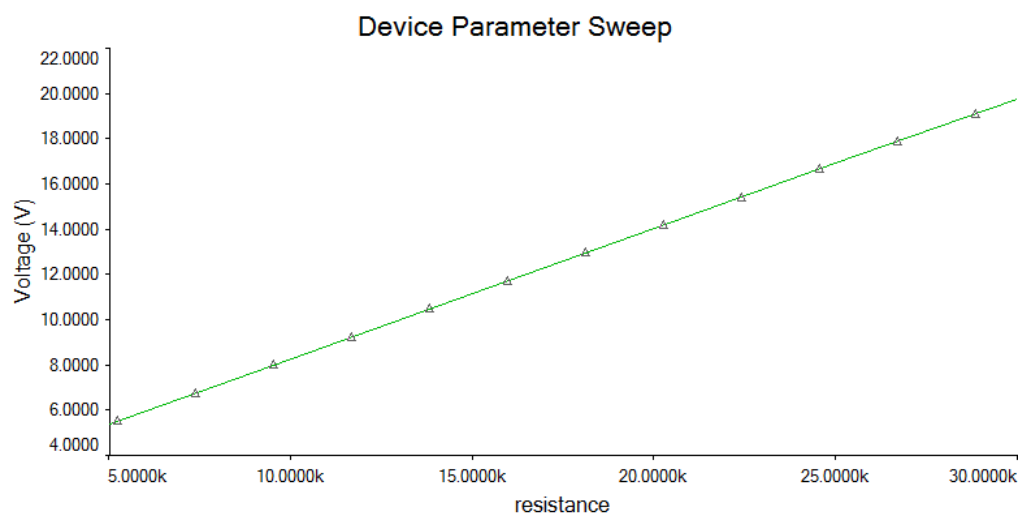


Рисунок 7 – Залежність вихідної напруги джерела живлення від зміни опору резистору R3

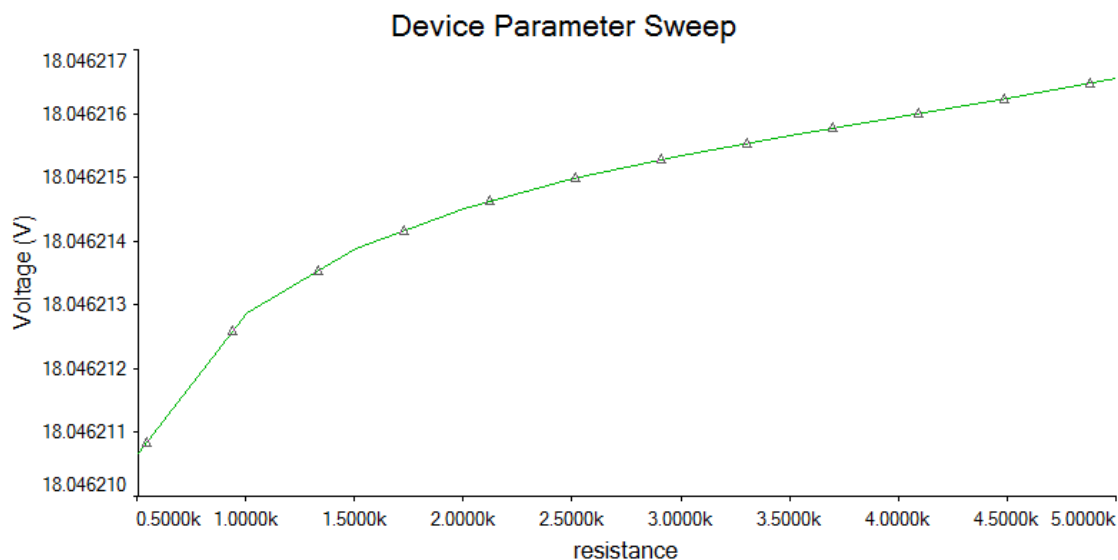
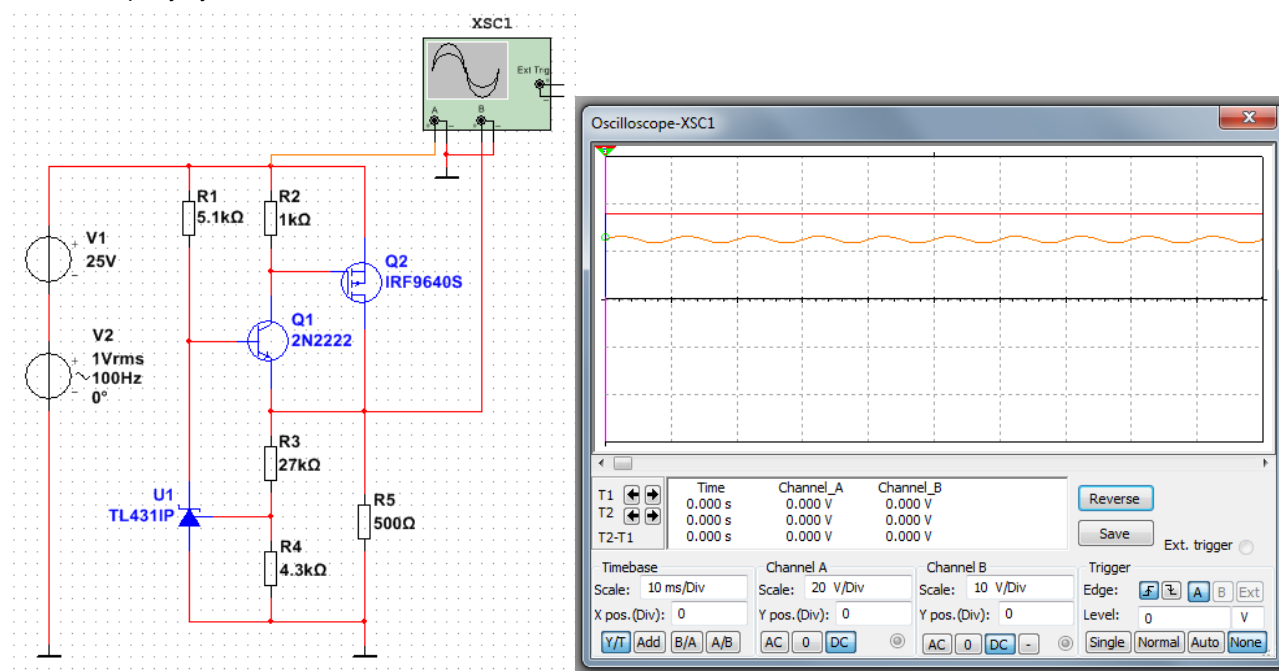


Рисунок 8 – Залежність вихідної напруги джерела живлення від зміни опору навантажувального резистору R5

Для виявлення ефекту придушення завад поставимо послідовно з еквівалентним джерелом постійної напруги 25 В джерело пульсацій ~ 2 В / 100 Гц і проведемо інтерактивне моделювання. Як бачимо, усі завади повністю придушуються.



а

б

Рисунок 9 – Схема для виявлення ефекту придушення завад (а) і порівняльні осцилограми напруг на вході та виході схеми (б)

Список використаних джерел

1. Henry Ott. Noise Reduction Techniques in Electronic Systems, Second edition, New York, John Wiley and Son, 1998.
2. TL431, TL432 Precision Programmable Reference – Datasheet – Texas Instruments
<https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tl431.pdf>
3. В.І. Сенько, М.В. Панасенко, Є.В. Сенько, М.М. Юрченко, Л.І. Сенько, В.В. Ясінський. Електроніка і мікросхемотехніка: У 4-х томах. Том 4. Книга 1. Силова електроніка: Навчальний посібник / За ред. В.І. Сенька. – К.: Каравела, 2012. – 640 с.
4. Колонтаєвський Ю.П., Сосков А.Г. Електроніка і мікросхемотехніка: Підручник / За ред. А.Г. Соскова. – К.: Каравела, 2009. – 416 с.

5. Електротехніка та основи електроніки: Підручник / А.М. Гуржій, С.К. Мещанінов, А.Т. Нельга, В.М. Співак. – Київ: Літера ЛТД, 2020. – 288 с.
6. Основи електроніки: Навчальний посібник / А.С. Васюра, Г.Д. Дорощенко, В.П. Кожем'яко, Г.Л. Лисенко. – Вінниця: ВНТУ, 2018. – 197 с.
7. Матвієнко М.П. Основи електроніки: Підручник. – К.: Ліра-К, 2017. – 364 с.

УДК 621.314

А.О. Махнов; к.т.н., доцент І.Л. Вінниченко

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

МОДЕЛЮВАННЯ РЕЗОНАНСНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ДЛЯ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ СУДЕН НА ЕЛЕКТРИЧНІЙ ТЯЗІ

За останні роки кількість суден на тягових батареях суттєво зросла по всьому світу. Щоб зменшити експлуатаційні витрати в морській промисловості та підтримувати низькі рівні забруднення, останні розробки зосереджені на розгортанні гібридних електричних суден і повністю електричних суден. Ці інноваційні системи пропонують численні переваги, включно з вищою ефективністю, що веде до економії витрат на паливо, зменшення забруднення та зниження рівня шуму. Додатково до цього, судноплавство нещодавно було включено до Системи торгівлі викидами ЄС у рамках програми ЄС «Fit for 55» («Придатний до 55»), а саме пропозиції FuelEU Maritime щодо просування екологічно безпечного морського палива, яка створить нові вимоги до суден, незалежно від їхнього прапора, які прибувають до портів ЄС або відходять з них, шляхом встановлення максимального обмеження на вміст парникових газів у споживаній енергії та посилення цих обмежень з часом. У результаті інші країни незабаром можуть поглянути на Норвегію та інші скандинавські країни як на піонерів у електрифікації поромів. Наприклад, відповідно до звіту Siemens Energy за 2022 рік, Німеччина, Греція, Італія та Великобританія мають великий і невикористаний потенціал для електрифікації своїх поромних флотів, на які припадає понад 35% викидів європейських поромів між ними. Набагато легше декарбонізувати пором, який працює на коротших маршрутах, ніж решту сектору судноплавства, на який припадає 3% світових викидів парникових газів (ПГ). Перспективним напрямом є заміна дизельних поромів на повністю електричні або гібридні моделі. Тим не менш, ключові проблеми залишаються. Вони включають необхідність чекати природного закінчення терміну служби існуючих поромів перед переходом на електричні альтернативи, збалансування розміру батареї з вагою судна та створення достатньої інфраструктури зарядки в портах [1, 2].

На сьогоднішній день, розроблені та побудовані судна:

- MF Amperge (Норвегія) – один з перших електричних поромів, який працює з 2015р.. Потужність батарей – 1090 кВт-год. Тип зарядки: Швидка зарядка на клеммах, потужність зарядки: 1,2 МВт [3];
- MBEllen (Данія): найбільший на момент запуску електричний паром. Тип батарей - літій-іонні батареї (Li-ion), ємність 4,3 МВт-год (4300 кВт-год). Тип зарядки Plug-in зарядка (підключення через кабель) з потужністю до 4 МВт. Час підзарядки під час зупинки 15-40 хвилин [4];
- MF Tycho Brahe (Швеція): електричний паром з резервними дизельними генераторами. Використовує батареї ємністю 4,160 МВт-год. Потужність зарядки до 10 МВт. [5];
- MF Folgefonn - це норвезький гібридний дизель/електричний паром. Він був переобладнаний з дизельного на електричний у 2018 році і став одним із перших електричних поромів у світі, який використовує бездротову зарядку. Тип батарей: літій-іонні батареї (Li-ion), ємність батарей: 1 МВт-год (1000 кВт-год) [6,7].

Наразі, основним типом зарядок залишається Plug-in зарядка - судно підключається до зарядного пристрою через кабель. При цьому, деякі пороми мають дуже короткі зупинки для розвантаження/завантаження, і є мало часу для підключення звичайних роз'ємів для передачі високої потужності. До того ж, суворе та солоне середовище та часта експлуатація роблять бажаним уникати прямих електричних та механічних контактів під час заряджання акумуляторів під час кожної зупинки.

Як наслідок, вдосконалення систем електроживлення акумуляторів даних суден потребує ефективних та надійних рішень, яким являє собою бездротова передача енергії — технологія передачі електричної енергії без використання фізичних провідників, що виключає механічний знос контактів при великих струмах і час, необхідний на кабельне підключення під час коротких стоянок, а також можливість струмів витоку і корозії в солоному середовищі, забезпечує гальванічну розв'язку і безпеку екстреного відключення батарей від берегової мережі, коли судну раптово потрібно залишити причал.

Завдяки зростанню інвестицій в розвиток систем зарядок на сьогоднішній день активно вдосконалюються та розробляються в тому числі бездротові зарядки, серед них:

- Wärtsilä's Wireless Charging System (Фінляндія) - потужність: до 1 МВт. Використовує індукційну технологію для передачі енергії та забезпечує ефективну передачу енергії на відстані до 20-50 см між зарядними панелями. Система інтегрована з портовою інфраструктурою. [7,8].
- ENRX (Норвегія) – компанія розробляє бездротові зарядні станції до 200кВт [9,10].

- WAVE (Ideanomics, USA) – компанія виробляє індуктивні бездротові зарядні станції потужністю 250кВт для автобусів [11].
- Bombardier (PRIMOVE) - компанія виробляє індуктивні бездротові зарядні станції потужністю 200кВт для автобусів [12].

Всі ці бездротові зарядні пристрої засновані на індуктивній передачі енергії, високий ККД якого можна досягнути завдяки резонансному методу: енергія передається між двома котушками індуктивності на резонансній частоті.

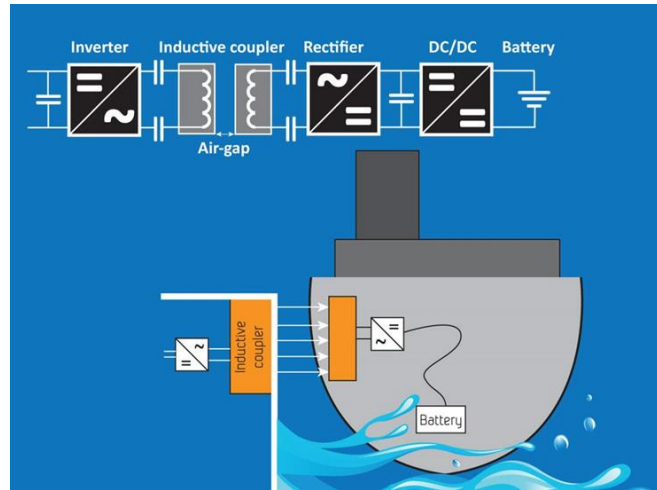


Рисунок 1 - Структурна схема системи бездротової зарядки акумуляторної батареї судна на основі резонансного перетворювача

При цьому, незважаючи на успіхи, резонансна бездротова передача енергії стикається з певними обмеженнями, основне з яких - стабільність та точність забезпечення умов резонансу. Дана проблема полягає в тому, що передача енергії є ефективною лише тоді, коли частоти передавача і приймача збігаються дуже точно. Зміни в зовнішніх умовах (хвилі, вітер, припливи та відливи, зміни осадки, крену, диференту під час вантажних операцій) можуть впливати на ці частоти, порушуючи умови резонансу. Це призводить до зниження ефективності передачі енергії або навіть повної втрати зв'язку. Для компенсації необхідні адаптивні механізми налаштування, які б дозволили автоматично компенсувати зовнішні впливи на процес зарядки. Вони можуть включати електронні регулятори або програмні алгоритми, які відстежують зміни частоти й автоматично коригують параметри системи.

Метою даної роботи є імітаційне моделювання резонансного перетворювача для системи безконтактної зарядки судна з кількісно-імпульсним регулюванням з метою визначення переваг та недоліків даного методу.

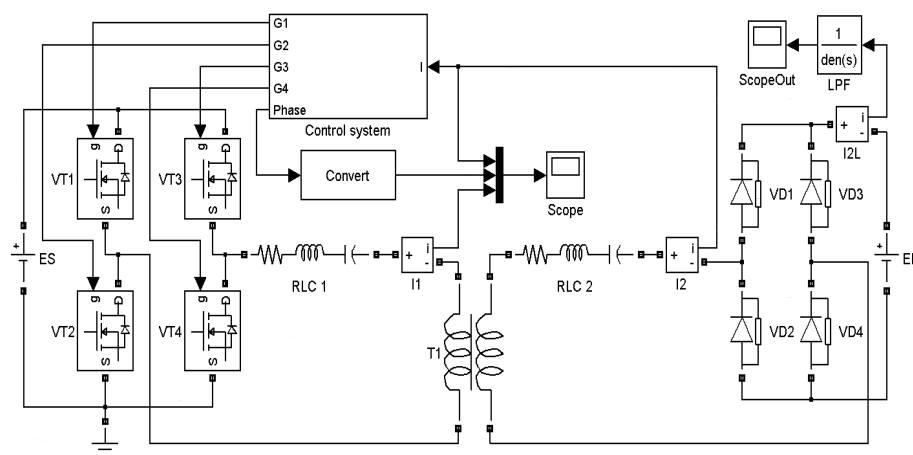
На сьогоднішній час, серед основних способів регулювання вихідних характеристик резонансних перетворювачів є:

- широтно-імпульсна модуляція (ШІМ), основна мета - точне керування потужністю, яка передається системою, шляхом зміни ширини імпульсів сигналу;
- частотне регулювання (частотно-імпульсна модуляція), основна мета - підтримка системи на резонансній частоті, щоб мінімізувати реактивні втрати і забезпечити найвищу ефективність передачі енергії;
- фазове регулювання, основна мета – підтримка мінімального фазового зсуву між струмом і напругою на котушках для мінімізації втрат енергії.

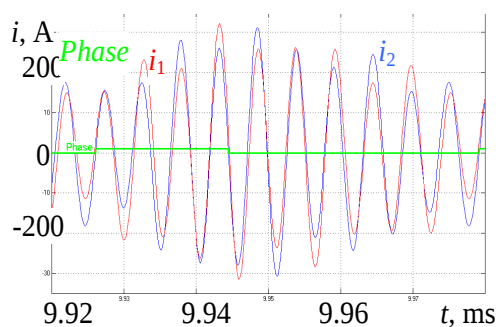
Розглянемо імітаційну модель резонансного перетворювача для системи бездротової зарядки судна з регулюванням кількості резонансних імпульсів за період передачі енергії та результати моделювання (рис. 2).

Метод керування числом резонансних імпульсів передбачає роботу перетворювача на резонансній частоті у всьому діапазоні керування, а синхронізація процесів у системі керування та силовій частині забезпечується навіть за умов зміни параметрів магнітної системи. Для високопотужних систем найкращим підходом є комбіноване регулювання. Комбінація фазового регулювання та регулювання частоти дозволяє досягти максимальної ефективності передачі енергії при мінімальних втратах, особливо в динамічних умовах, а ШІМ дозволяє точно управляти потужністю, особливо в ситуаціях зі змінним навантаженням (наприклад, коли рівень заряду акумулятора змінюється).

Висновки. Проведено імітаційне моделювання резонансного перетворювача із регулюванням вихідного струму шляхом зміни кількості резонансних імпульсів для системи бездротової зарядки судна. Метод керування числом резонансних імпульсів передбачає роботу перетворювача на резонансній частоті у всьому діапазоні керування, а синхронізація процесів у системі керування та силовій частині забезпечується навіть за умов зміни параметрів магнітної системи.



а



б

Рисунок 2 - Модель резонансного перетворювача для системи бездротової зарядки судна (а) та резонансний струм першого та другого резонансних контурів (б)

Список використаних джерел

1. Polly Bindman, «The secret to the rapid electrification of ferries». Available: https://www.ship-technology.com/features/the-secret-to-electric-ferries/?utm_source=&utm_medium=8-93197&utm_campaign=&cf-view&cf-view. 22.03.2023.
2. EUROPEAN COMMISSION, Brussels, «'Fit for 55': delivering the EU's 2030 Climate Target on the way to climate neutrality». Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52021DC0550>. 14.07.2021.
3. Kunwar Aditya, Sushan Pradhan, Avishek Muni «Feasibility Study on Mega-Watt level Fast charging system for shore power supply using wireless power transfer technology», p. 4, 2022.
4. Marcin Kolodziejki, Iwona Michalska-Požoga «Battery Energy Storage Systems in Ships' Hybrid/Electric Propulsion Systems», p. 12, 2023.
5. Tycho Brahe Hybrid Ferry Case Story. Available: <https://www.deif.com/media/subc3l04/tycho-brahe-uk-lowres.pdf>. 05.12.2019.
6. MF Folgefonn. Available: <https://corvusenergy.com/projects/folgefonn>.
7. Yajie Chen, Zhiqiang Pan, Ming Ni, Haibo Gao «Design of Marine High Power Wireless Charging System», 2020.
8. Alexander Farnsworth «The evolution of wireless charging». Available: <https://www.wartsila.com/insights/article/the-evolution-of-wireless-charging>. 21.06.2017.
9. Офіційний сайт компанії ENRX. Available: <https://bus-news.com/suppliers/enrx>.
10. Офіційний сайт компанії ENRX. Available: <https://www.enrx.com/en/Induction-Applications/Inductive-charging-and-power-applications/Marine-and-ships>.
11. Офіційний сайт компанії Wave. Available: https://wavecharging.com/wp-content/uploads/2023/06/WAVECharging_AVTA-Case-Study.pdf.
12. «Bombardier PRIMOVE to Provide Wireless Charging and Battery Technology to Berlin». Available: <https://www.3blmedia.com/news/bombardier-primove-provide-wireless-charging-and-battery-technology-berlin>. 24.03.2015.

СЕКЦІЯ 5. АВТОМАТИЗОВАНИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД

УДК 681.5

Білюк І.С., к.т.н., доц., Савченко О.В., викладач кафедри автоматики, Рачинський А.В., аспірант кафедри автоматики

Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, м. Миколаїв

СПОСІБ МОДЕРНІЗАЦІЇ ЕЛЕКТРОПРИВОДА БУРОВОЇ УСТАНОВКИ

В нафтовій і газовій промисловості буріння проводиться за допомогою бурової установки – комплексу устаткування, що включає бурову вежу (щоглу), силовий привід, механізм пересування, устаткування для механізації спуско-піднімальних операцій і очищення свердловин та ін.

Бурова установка складається з вежі, що підтримує на вазі бурильну колону, силового приводу, устаткування для обертання і подачі бурового долота, насосного комплексу для прокачування бурового розчину, пристроїв для його приготування і очищення від вибуреної породи і газу і відновлення якості, комплексу устаткування для спуску і підйому колон для зміни зношеного долота, устаткування для герметизації гирла свердловини, контрольно-вимірних приладів та інших пристроїв[1].

Метою даної роботи є автоматизація лебідки бурової установки за допомогою заміни застарілої релейно-контакторної схеми на сучасний частотний перетворювач.

Електропривід лебідки. Бурова лебідка призначена для підйому і спуску бурильної колони, вироблених періодично для заміни породоруйнівного долота. На установках різних класів встановлена потужність привода лебідки 250...2500 кВт. Вид привода і його характеристики повинні вибиратися з урахуванням наступних вимог і технологічних особливостей роботи лебідки в режимі підйому:

- режим роботи привода – повторно-короткочасний.;
- реверс двигуна в основних робочих режимах не потрібний, він необхідний тільки в рідкісних допоміжних режимах і може здійснюватися шляхом оперативних перемикачів.;
- бажане більш повне використання потужності привода при зміні моменту навантаження в широких межах (до 20 разів);
- привід повинен мати такі пускові характеристики, щоб забезпечувався плавний, але достатньо інтенсивний розгін лебідки;
- жорсткість механічної характеристики повинна бути такою, щоб статизм не перевищував 5...8% номінальної частоти обертання;
- привід лебідки повинен забезпечувати зупинку гака талевої системи з точністю $\pm 30...40$ мм;
- на установках глибокого буріння привід лебідки повинен бути дворуховим з міркувань резервування, причому максимальне розрахункове зусилля на гаку повинне забезпечуватися при роботі одного двигуна.

Залежно від класу бурової установки для привода лебідки рекомендується застосовувати: для установок глибокого і надглибокого буріння – глибоко регульований редуктор або безредукторний електропривод з аварійною механічною передачею залежно від ряду додаткових вимог; для інших бурових установок – регульований електропривід з діапазоном регулювання до 10:1.

На буровій установці використовується асинхронний електродвигун з короткозамкнутим ротором типу АЗ-13-62-8УХЛ2, який має номінальну потужність 630 кВт та частоту обертання 740 об/хв. Електродвигун призначений для привода механізмів з переміжним навантаженням, частими і важкими умовами пуску, а також механізмів, що вимагають регулювання частоти обертання; використовуються для привода лебідки і ротора.

Як датчик кутової швидкості використовується кутовий енкодер RESM 125, що надходить у комплекті з двигуном. RESM 125 – це «кільцевий» енкодер (енкодер у формі кільця), безконтактного типу.

Для потужності двигуна 630 кВт обираємо перетворювач шафового виду 6SE71, межі його потужностей: 37 – 1500 кВт. з 6-ти пультською схемою випрямлення. Обираємо привід „SIMOVERT MASTERDRIVES” тип 6SE7141-1NJ62-3BA0[2, 3] із наступними даними:

- напруга живлення 3-фазна змінна = 690 В;
- номінальна потужність $P_{\text{ном.}} = 1000$ кВт;
- номінальний вихідний струм $I_{\text{ном.}} = 1080$ А;
- базовий струм навантаження $I_6 = 983$ А;
- струм перевантаження $I_{\text{мах.}} = 1469$ А;
- вхідний струм $I_{\text{вх.}} = 1188$ А;
- втрати потужності при 2,5 кГц $P_{\text{втр.}} = 23,3$ кВт;

Перетворювачі шафового виконання мають єдину концепцію інтерфейсу з людиною. Перетворювачі частоти, інвертори й випрямлячі можуть управлятися як з передньої панелі блоку, так і дистанційно: з передньої панелі за допомогою РМУ блоку керування й налаштування.

Функціональна блок-схема[4] системи керування приводом лебідки бурової установки зображена на рис.1.

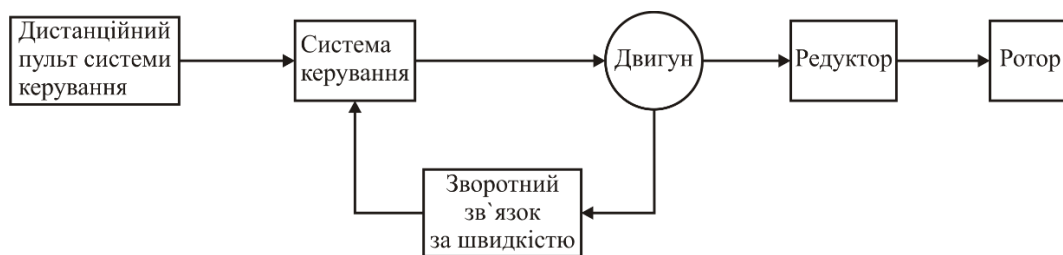


Рисунок 1 – Функціональна блок-схема системи керування

Структурна схема лінеаризованої системи з частотно-струмовим керуванням представлена на рис. 2.

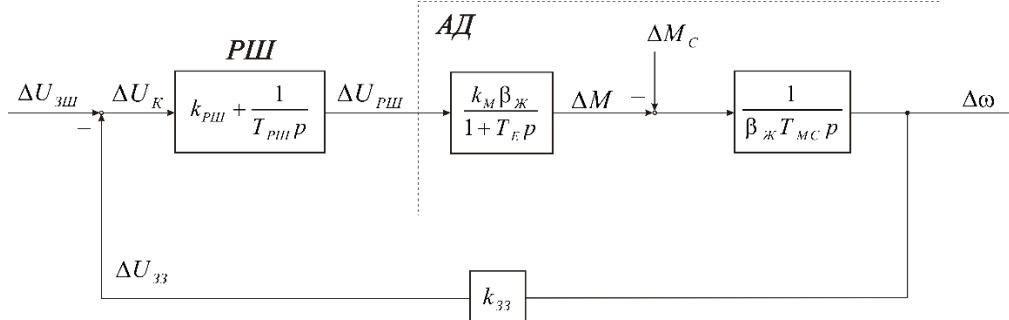


Рисунок 2 – Структурна схема системи ПЧ – АД з частотно-струмовим керуванням

Частотне керування без впливу на частоту з боку функції керування (дискрета завдання 0.001 Гц); застосовується для одно- або багатодвигунових приводів із двигунами *SIEMOSYI* і індукторними двигунами з великою точністю підтримки швидкості, тобто для цементної промисловості.

Ці види U/f керування містять у собі наступні функції: їх компенсація, - струмообмеження що впливає як на частоту, так і на напругу. Захисне демпфірування для захисту двигуна від ефекту резонансу й компенсація ковзання (крім U/f структури для цементної промисловості). Синусоїдальний фільтр дозволяє забезпечити практично синусоїдальну форму вихідної напруги й струму. При використанні синусоїдального фільтра вищі гармоніки у вихідній напрузі стосовно напруги частоти 50Гц становлять усього 5%. Рівень пікових напруг подаваних на двигун нижче чим вимагає *DIN VDE 0530*.

Після розрахунку параметрів елементів було отримано результати, частина яких наведена у таб.1.

Таблиця 1 – Результати розрахунку параметрів елементів

M_{max}	T_E	$U_{зш}$	$T_{РШ}$	$\beta_{Ж}$	K_M	T_M	$k_{зз}$	$W_{РШ}(p)$
20063.69 Н·м	0.0505 с	9,97	2,95 с	10142,4 Н·м/с ⁻¹	1.047 1/В·с	0.0037 с	0.127 В·с/рад	0.137

За допомогою програмного середовища MATLAB, модулю Simulink, побудуємо модель системи керування приводом ротора бурової установки.

Дані для розрахунку взяті з параметрів обраних елементів системи та аналізу входів/виходів кожного ланцюга структурної схеми системи[5]. Структурна схема, створена у середовищі MATLAB, представлена на рис.3.

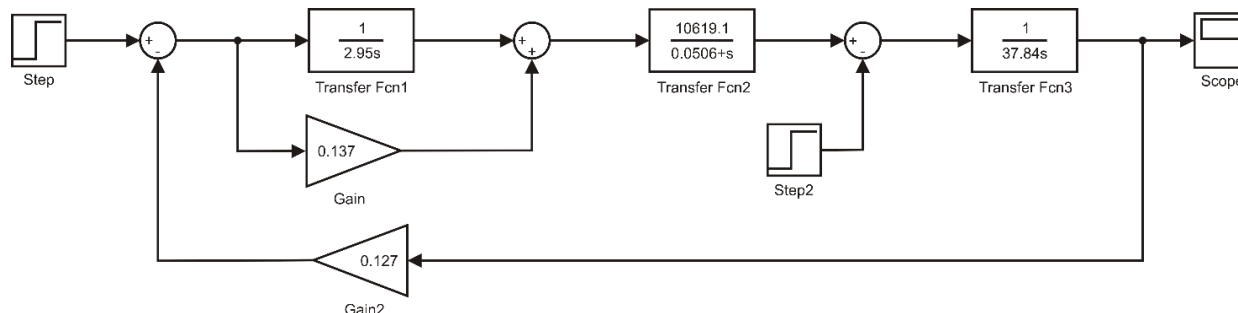


Рисунок 3 – Структурна схема системи у середовищі MATLAB

Знаючи всі параметри математичної моделі двигуна, а також системи управління зробимо її моделювання з метою оцінки стійкості системи і показників якості керування. Отриманні графіки показані на рисунках 4 та 5.

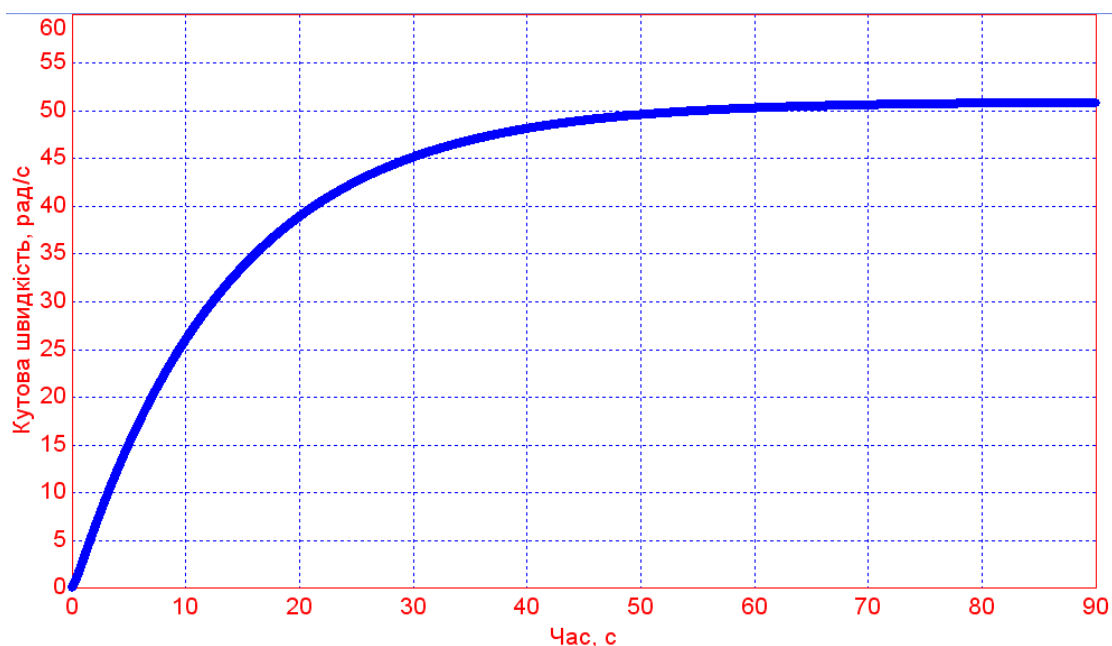


Рисунок 4 – Перехідний процес швидкості електропривода

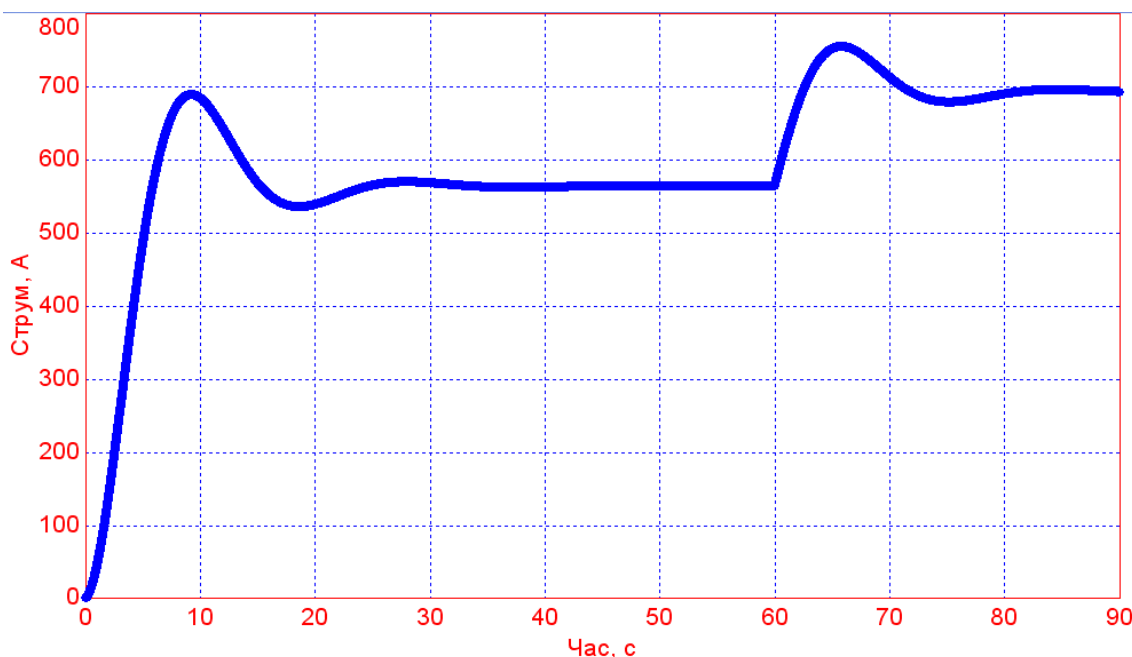


Рисунок 5 - Перехідний процес струму електропривода при стрибкоподібній зміні навантаження

Розглядаючи рисунок 4, можна прийти до висновку, що пуск привода при повній загрузці ($T_{\max} = 76$ секунд). Статична похибка в режимі пуску під навантаженням $\Delta = 0\%$. Тобто система керування забезпечує таке регулювання двигуном, що час перехідного процесу збільшується, перерегулювання, а також статична похибка практично однакові, при впливі збуджувального моменту, а також без нього.

На рис.5 показані перехідні процеси струму електропривода, які відповідають перехідним процесам кутової швидкості. При пуску система має наступні показники якості: перерегулювання $\sigma_{\max} = 8,6\%$, час перехідного процесу $T_{\max} = 76$ секунд.

Ці процеси задовольняють вимогам діючої мережі.

З отриманих вище характеристик системи, можна зробити висновок, що вона забезпечує показники якості керування, які задовольняють вимогам. З цього випливає наступне: можна робити заміну існуючої системи на спроектовану систему[6].

Висновок. В роботі розроблено систему керування електроприводом лебідки бурової установки. В ході роботи було виконано синтез системи керування на базі перетворювача частоти. Використання перетворювача частоти в складі системи керування бурової установки дозволило спростити структуру системи керування електроприводом лебідки, покращити її характеристики.

Результатом проектування є автоматизований електропривод, система керування якого заснована на програмованих мікроконтролерах. На сьогодні ефективність використання програмованих систем є найбільшою, окупність коштів, що вкладені в такі системи, є найбільш швидкою.

Дана модернізація не погіршила характеристик системи керування та повністю відповідає цілям роботи

Список використаних джерел

1. Басарыгин Ю.М., Булатов А.И., Проселков Ю.М. Бурение нефтяных и газовых скважин: Учеб. пособие для вузов. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2002. – 632с.
2. Білюк, І. С., Савченко, О. В., Гаврилов, С. О., Іваницький, А. Б., & Теремов, С. В. (2021, November). АВТОМАТИЗОВАНИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД ВІЗКА МОСТОВОГО КРАНУ. In *The XI International Science Conference «Modern aspects of science and practice»*, November 30–December 03, 2021, Melbourne, Australia. 590 p. ISBN-978-1-68564-520-5 (p. 521).
3. SIMOVERT MASTERDRIVES Vector Control приводи від 2.2 до 2300 кВт DA 65.10 · 2001, 302p.
4. German-Galkin S.G. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в Matlab 6.0. - СПб: KORONA print, 2001. - 320 p.
5. Terekhov V.M. Системы управления электроприводов. - М.: Академия, 2004. - 296 p.
6. Білюк, І., Савченко, О., Руденко, К., Малиновський, С., & Філоненко, Р. (2023). Спосіб модернізації електропривода насосного агрегату водопостачання. *Scientific Collection «InterConf»*, (182), 201-207.

УДК 681.5

Білюк І.С., к.т.н., доц., Савченко О.В., викладач кафедри автоматики, Льовкін В.С., аспірант кафедри автоматики

Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, м. Миколаїв

УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ДЕРЕВОБРОБНОГО ВЕРСТАТА

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є модернізація системи керування приводу рейсмусового верстату. В роботі проведено синтез системи автоматичного керування, а також розрахунок параметрів електропривода. Розроблена математична модель системи керування швидкістю електроприводу. Досліджено вплив параметрів регулятора на показники якості перехідних процесів.

В роботі потрібно розглянуто наступні завдання:

- призначення та область застосування рейсмусових верстатів
- вибрати та розглянуто перетворювач частоти
- скласти функціональну схему системи керування електропривода подачі верстата. Обґрунтувати вибір елементів системи керування електропривода;
- побудувати структурну схему системи керування електропривода верстата та виконати розрахунок параметрів її елементів;
- провести моделювання системи керування електропривода в *MATLAB* та дослідити вплив параметрів регуляторів на якість керування.

Об'єкт дослідження. Перехідні процеси в електроприводі подач рейсмусового верстата на основі асинхронного двигуна з короткозамкнутим ротором.

Предмет дослідження. Параметри регуляторів системи керування електропривода верстата, які впливають на якість керування.

Методи дослідження. Заміна застарілої системи керування на основі релейно-контакторної схеми на сучасний частотний перетворювач[2]. Теоретичні дослідження виконані із залученням сучасної теорії електропривода, методів теорії автоматичного керування та комп'ютерного моделювання у *MATLAB*.

Рейсмусовий однобічний верстат СР-6-9 призначений для поздовжнього, одностороннього стругання в розмір по товщині від 5 до 200 мм поверхонь плоских заготовок шириною до 630 мм, з деревини хвойних і листяних порід з вологістю не більше 15%. Верстат СР-6-9[1] відноситься до універсального обладнання і застосовується в серійному і дрібносерійному виробництві столярних виробів в будівельній галузі, меблевої, суднобудуванні, вагонобудуванні.

Для модернізації привода подачі рейсмусового верстата було обрано чистотний перетворювач *Simphoenix E500-4T0015B* [3], який має наступні характеристики:

- Номінальна вхідна напруга, частота три фази, 380 В, 50/60 Гц;
- Номінальна потужність 1,5кВт;
- Вихідна частота 0,0 – 1000 Гц;
- Режим керування: Скалярний, векторний, VWF;

Для модернізації привода подачі рейсмусового верстата було обрано електродвигун *Siemens 1LA7090-4AA10*[4].

Електродвигуни *Siemens серії 1LA* застосовують для промислових приводів. Вони охоплюють широку область застосування приводної техніки з живленням, як від мережі, так і від частотних перетворювачів і

характеризуються високими показниками питомої потужності, конструктивної міцності та високою надійністю і великим терміном експлуатації. Основні параметри зведено у таблицю 1.

Таблиця 1 – Основні параметри двигуна

Номінальна потужність	1100 Вт
ККД	75
Коефіцієнт потужності	0,81
Кількість пар полюсів	2
Синхронна частота обертання	1500 об/хв
Номінальна частота обертання	1460 об/хв
Момент інерції двигуна	0,0032 кг·м ²
ККД при навантаженні 75%	76
Коефіцієнт потужності при навантаженні 75%	0,73

Після розрахунку всіх величин, деякі результати наведено у таблиці 2, які входять в структурну схему[5], необхідно підставити їх в модель векторної системи керування. Провести моделювання та отримати графік перехідних процесів.

Таблиця 2 – Деякі данні розрахунку.

$T_{1\phi}$	$T_{1\pi 1}$	$T_{1\pi 2}$	T_{π}	T_2	K_{OT2}	$T_{ип}$	K_{oc}	K_{π}	$W_{P\pi}$	$R_{1\phi}$	K_r	L_m	J_{Σ}	$K_{оп}$	K_{OT1}
0,0036	0,0343	0,00663	0,001	0,187	0,877	0,00401	0,0637	32,6	839,0	8,63	0,9589	0,429723	0,0352	10,6	4,54

Виконаємо моделювання векторної системи керування:

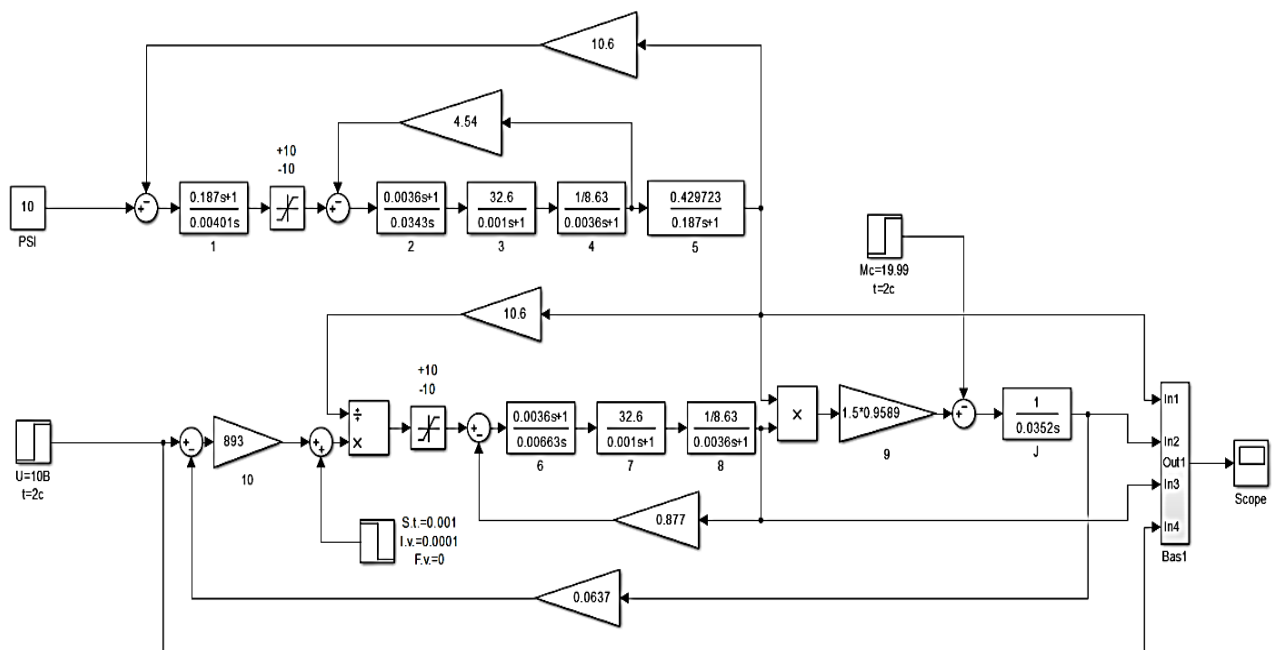


Рисунок 1 – Моделювання векторної системи керування електроприводом

В результаті моделювання системи ми отримали графіки перехідних процесів, які показано на рисунку 2.

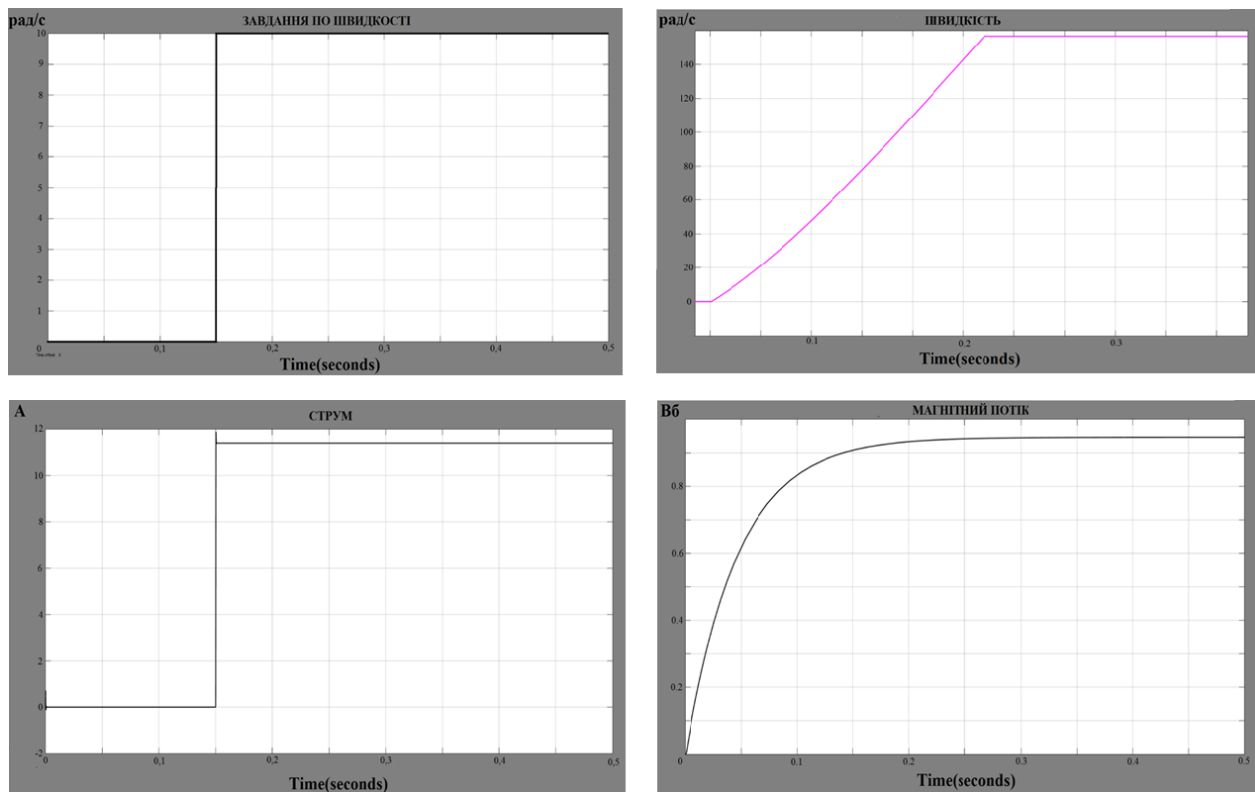


Рисунок 2 – Перехідні характеристики

Аналізуючи результати отримані при моделюванні робимо висновки:

- векторна система керування дозволяє майже повністю виключити небезпечні кидки струму і моменту;
- перед пуском необхідна пауза для збудження машини;
- дозволяється керувати моментом двигуна.

Тож, можна сказати, що векторна система керування електроприводом подачі верстату спроектована вірно та задовольняє вимогам.

В оптимізованій моделі векторної системи керування з графіків перехідних процесів видно, що поточозчеплення досягає режиму, що встановився приблизно за 0,15 с ($t_{\text{пн}} = 0,15$). Тому, за рекомендацією, через 0,15 с задаємо скачок керуючого впливу по швидкості ротора, вже з 0,15 с починається розгін двигуна та усталений режим настає приблизно на 0,22 с.

Висновок. В роботі було замінено застарілу релейно-контакторну схему на сучасний частотний перетворювач із векторним керуванням. В ході роботи було розв'язано наступні завдання[6]:

- розглянуто компонування, технічні характеристики та електрообладнання верстата;
- складено функціональну схему системи керування електропривода. Обґрунтовано вибір елементів системи керування електропривода;
- побудовано структурну схему системи керування електропривода верстата та виконано розрахунок параметрів її елементів;
- проведено моделювання системи керування електропривода подач верстата в *MATLAB* та досліджено вплив параметрів регуляторів на якість керування.

Аналізуючи результати отримані при моделюванні робимо висновки:

- векторна система керування дозволяє майже повністю виключити небезпечні кидки струму і моменту;
- перед пуском необхідна пауза для збудження машини;
- дозволяється керувати моментом двигуна.

Тож, можна сказати, що векторна система керування електроприводом подачі верстату спроектована вірно та задовольняє вимогам.

Список використаних джерел

1. Ресмусний верстат CP6 Рейсмус // - режим доступу: <https://pstech-ukraine.com/ua/p819230423-resmusnyj-standok-sr6.html>
2. Білюк, І. С., Гуров, А. П., Савченко, О. В., Майборода, О. В., & Марченко, А. В. (2022). СПОСІБ МОДЕРНІЗАЦІЇ ПРИВОДА ПОДАЧ ТОКАРНОГО ВЕРСТАТА. *Trends in science and practice of today*, 29, 306.
3. Simphoenix E500-4T0015B 1,5 кВт 380 В. <https://ewi-engineering.com.ua/> — режим доступу <https://ewi-engineering.com.ua/uploads/1/content/Simphoenix-E500.pdf>

4. Електродвигуни серії Siemens 1LA (в алюмінієвому корпусі) // - Режим доступу: https://ventilator.kiev.ua/siemens/electric_motors_1LA.html
5. Білюк, І. С., Шарейко, Д. Ю., Фоменко, А. М., & Савченко, О. В. (2018). Комплексні електроприводи. Ч. 3. Сервоелектроприводи.
6. Білюк, І. С., Савченко, О. В., Надточій, Т. М., Надточій, І. В., & Рябий, П. І. (2023). Спосіб модернізації настільного токарного верстата.

УДК 004

Дьяконов О.С.¹, к.т.н., доц., Іхсанов Ш.М.¹, к.т.н., доц., Воскобоєнко В.І.², технічний директор, власник, Федорук Д.Л.², інженер-конструктор.

¹Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, м. Миколаїв

²ТОВ НВП «Інтер Електро», м. Миколаїв

ОСОБЛИВОСТІ ПІДГОТОВКИ КЕРУЮЧИХ ПРОГРАМ ДЛЯ ФРЕЗЕРНИХ ВЕРСТАТІВ ПРИ ГРАВІРУВАННІ ПОЯСНЮВАЛЬНИХ ТАБЛИЧОК ДЛЯ СУДНОВОЇ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОЇ ПРОДУКЦІЇ

Головні розподільні щити (ГРЩ) є важливими компонентами суден та забезпечують розподіл електроенергії по всьому судну. Вони повинні бути розроблені та виготовлені з високою точністю та якістю, щоб забезпечити безпеку та надійність експлуатації електроенергетичної системи судна. Не менш важливим питанням є врахування ергономіки при розробці ГРЩ, зокрема в частині пояснювальних написів, що розташовуються на лицьових панелях секцій ГРЩ. Згідно з [1] рукоятки всіх апаратів та шкали приладів повинні мати таблички з написами, які пояснюють їхнє призначення. На одній із панелей секції управління також повинна кріпитися структурна схема ГРЩ. Чіткі та контрастні написи, виконані методом гравірування, що стійкі до стирання, дозволяють безпечно експлуатувати суднове електротехнічне обладнання упродовж всього терміну його експлуатації.

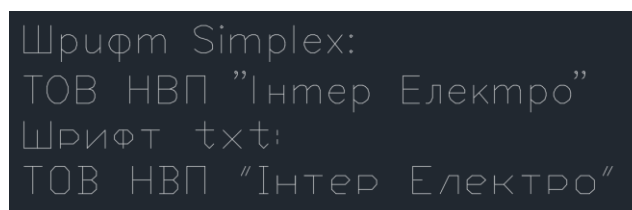
Метою роботи є розробка методики отримання керуючої програми фрезерного верстату для нанесення написів методом гравірування при виготовленні інформаційних табличок для лицьових панелей судових ГРЩ.

Проблема використання шрифтів «TrueType» та «SHX» при їхній векторизації у САПР AutoCAD. Для розробки дизайну табличок може використовуватися САПР креслення, наприклад, AutoCAD. Всі шрифти, доступні в AutoCAD, можна умовно розділити на дві категорії [2]:

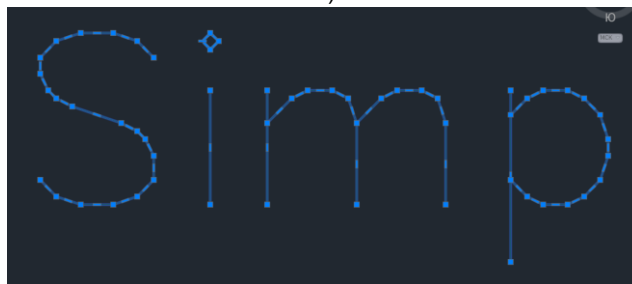
- шрифти типу «True Type» (мають розширення *.ttf) - це шрифти, стандартні для Windows. Вони поділяються на дві групи: частина цих шрифтів є в операційній системі від початку, а частина вбудовується в ОС з іншими програмами (наприклад, разом з Microsoft Office). Шрифти TrueType не змінюють товщину букв та цифр;

- шрифти «shx» (мають розширення *.shx) - це внутрішні векторні шрифти AutoCAD. Для шрифтів із розширенням *.shx можна встановлювати різну товщину обведення контурів букв та цифр.

Для формування керуючої програми для фрезерного верстату текст написів повинен бути набраний векторним, монолінійним, скелетним шрифтом. Прикладом таких шрифтів є bold, cdm, cdm_nc, dim, simplex, txt. Слід зазначити, що не всі шрифти *.shx мають підтримку символів кирилиці. Найбільш підходящим для цілей гравірування написів є шрифт simplex (рис. 1, а). Векторизація даного шрифту у полілінії відбувається за допомогою команди TXTEXP. Результат виконання даної команди представлений на рис. 1, б. З рисунку 1, б бачимо, що криволінійні сегменти при векторизації апроксимуються набором прямолінійних сегментів.



а)



б)

Рисунок 1 – Монолінійні векторні шрифти Simplex та txt (а), перетворення шрифту у полілінії за допомогою команди TXTEXP

Зазначимо, що при векторизації шрифтів *.tff для символу отримаємо два замкнені контури – внутрішній та зовнішній, тому при гравіруванні фрезою буде проходити кожен символ по двох зазначених контурах, що призводить до збільшення часу гравірування в два рази. Також важко контролювати кінцеву товщину символу.

Отже, використання шрифту simplex в певній мірі дозволяє уникнути вказаних вище проблем при векторизації шрифтів типу «True Type», однак є два головних недоліки:

- відсутня підтримка розширеної кирилиці, у тому числі українських літер «Ї», «Є», «Ґ», символів грецького алфавіту та математичних спецсимволів;
- всі криволінійні сегменти замінюються лінійними сегментами, що візуально помітно на готовому виробі.

Реалізація шрифту ГОСТ 26.008-85 у САПР AutoCAD. Даний стандарт [3] поширюється на шрифти приладової гарнітури за ГОСТ 26.020 накреслень Пр3 (прямого нормального напівжирного) та Пр41 (прямого вузького світлого) для нанесення написів методом гравірування на засоби вимірювання та автоматизації, радіоелектронну апаратуру, обчислювальну техніку та інші вироби. Стандарт регламентує виконавчі розміри шрифтів Пр3 та Пр41.

Для кожного символу шрифту Пр3 у САПР AutoCAD був створений відповідний блок (рис. 2). Назва блоку співпадає з юнікодом відповідного символу у hex-форматі. Для автоматизованого розміщення символів у кожному блоці є атрибут «WIDTH», значення якого за замовчуванням дорівнює ширині символу.

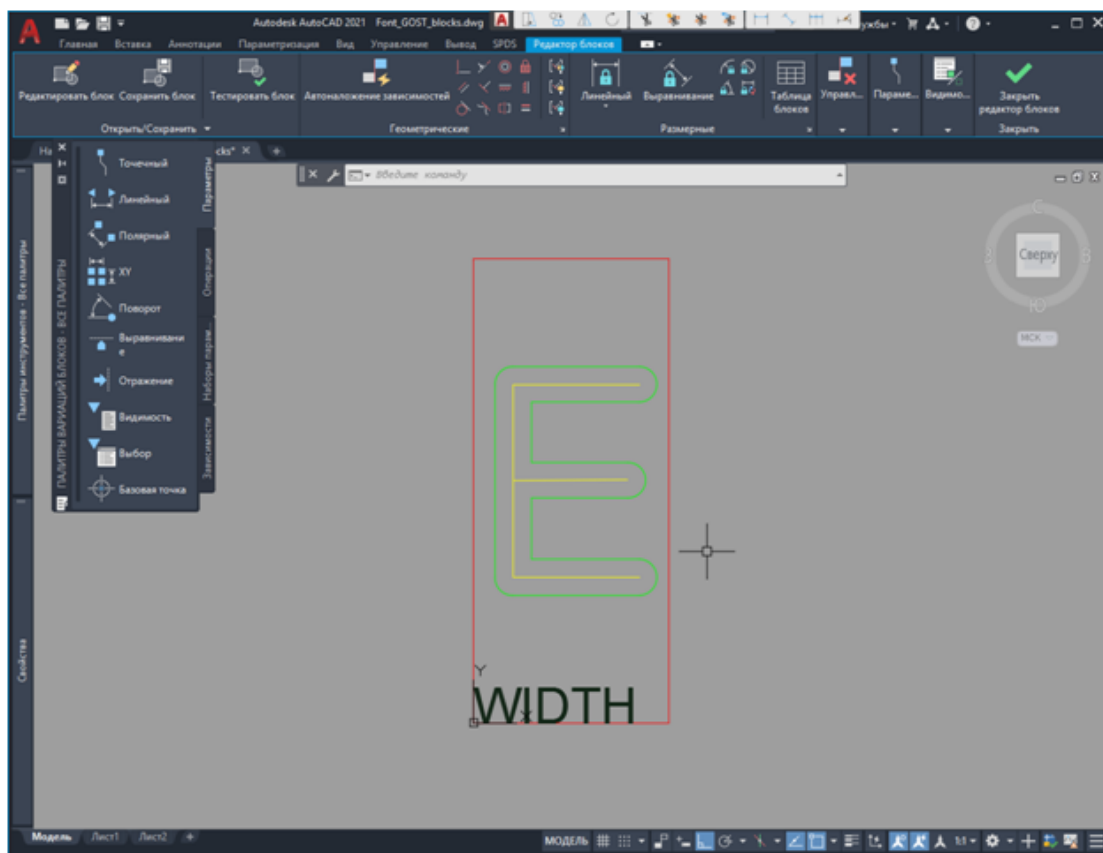


Рисунок 2 – Створення геометрії символу у вигляді блоку з атрибутом «WIDTH»

Процес зручного отримання кінцевої геометрії текстових табличок, яка придатна для генерування керуючої програми для фрезерного верстату виглядає наступним чином:

- підготовка всіх необхідних написів у текстовому редакторі Microsoft Word;
- застосування розробленого макросу Microsoft Word для переведення написів у відповідні юнікоди (лістинг 1);
- збереження згенерованих юнікодів символів у текстовий файл;
- запуск розробленого autolisp-скрипту для зчитування юнікодів символів з текстового файлу та побудови геометрії символів у просторі моделі САПР AutoCAD.

Лістинг 1 – Код макросу Microsoft Word

```
Sub Макрос2()
'
' Макрос2 Макрос
'
```

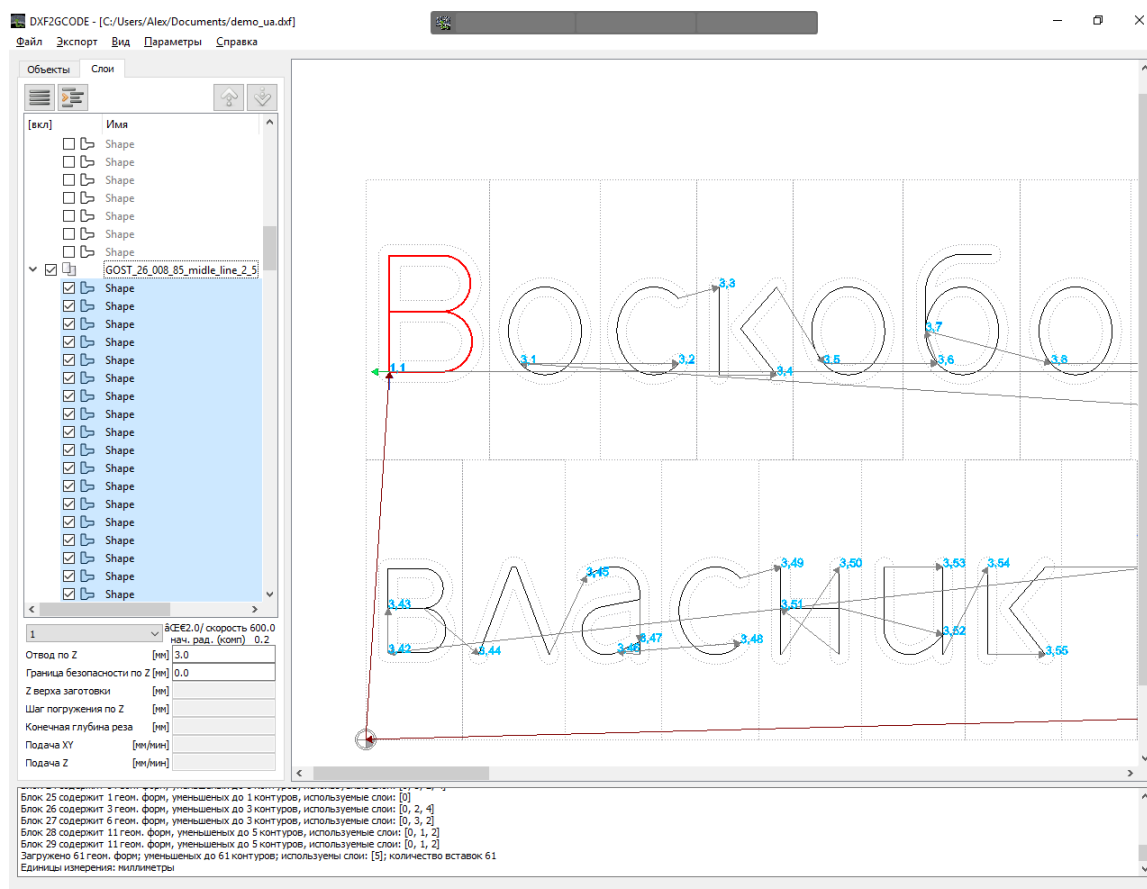
```
SelLength = Selection.End - Selection.Start
Selection.MoveEnd Unit:=wdCharacter, Count:=-SelLength
```

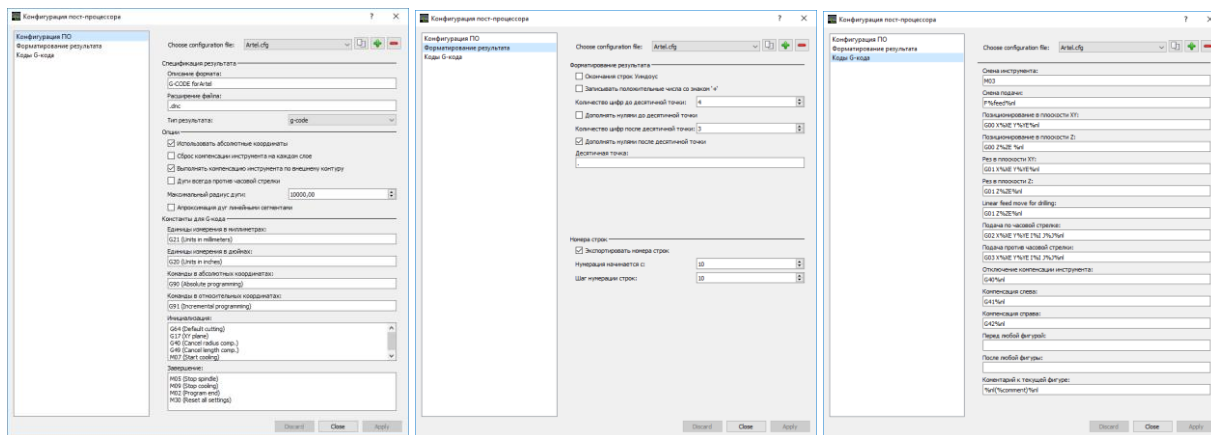
```
For Index = 1 To SelLength
    Selection.TypeText Text:="\u"
    Selection.MoveRight Unit:=wdCharacter, Count:=1, Extend:=wdExtend
    Char = Selection.Characters(1).Text
    Code = AscW(Char)
    If Code = 13 Then
        Selection.TypeText Text:="000A"
        Selection.MoveRight Unit:=wdCharacter, Count:=1

        If Index <> SelLength Then
            Selection.TypeBackspace
        End If
    Else
        Selection.ToggleCharacterCode
        Selection.MoveRight Unit:=wdCharacter, Count:=1
    End If
Next

End Sub
```

Генерування керуючої програми для фрезерного верстату. Для отримання керуючої програми у вигляді G-кодів зручно використовувати програму dxf2gcode [4], яка має можливість зробити оптимізацію руху інструменту під час фрезерної обробки (рис. 3). Також програма дозволяє індивідуально задати параметри фрезерної обробки для окремого шару AutoCAD. Dxf2gcode пряцює з форматом вихідного файлу *.dxf.





а)

б)

в)

Рисунок 4 – Налаштування постпроцесора для верстату АртМайстер в програмі dxf2gcode: (а) – команди ініціалізації, завершення, (б) – форматування результатів, (в) – форматування G-кодів



Рисунок 5 – Процес фрезерної обробки на верстаті АртМайстер

Висновки. Для гравірування табличок за стандартом ГОСТ 26.008-85 необхідно було реалізувати геометрію символів у САПР AutoCAD. Кожен символ представляє собою визначення блоку. Для автоматизованого формування тестових фраз, які використовуються при створенні табличок, був розроблений autolisp-скрипт, що зчитує юнікоди з текстового файлу та будує відповідні символи в просторі моделі AutoCAD. Формування юнікодів символів здійснюється у текстовому редакторі MS Word. Запропонований метод генерації геометрії тексту для табличок дозволяє зберегти криволінійні сегменти та зменшити об'єм керуючої програми шляхом використання команд кругової інтерполяції (команди G-коду G02, G03).

Список використаних джерел

1. Яковлев Г. С. Суднові електроенергетичні системи: Підручник. – 5-е вид., перероб. та доп. – Л. Суднобудування, 1987. – 272 с.
2. Табакова І. С. Адаптація шрифту AUTOCAD до вимог ЕСКД. // Поліграфічні, мультимедійні і web-технології : тези доповідей 2-ї Міжнародної науково-технічної конференції, 16-22 травня 2017 г. – Харків : ХНУРЕ, 2017. – Т. 1. – С. 228-232.
3. ГОСТ 26.008-85. Шрифты для написов, що наносяться методом гравіювання. Виконавчі розміри. – [Чинний від 01.07.1992, зм. №3]. Вид. офіц. М: Стандартінформ, 2008. 26 с.
4. Програма dxf2gcode [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://sourceforge.net/projects/dxf2gcode/>
5. Фрезерні верстати з ЧПУ. Компанія ТОВ «Артіль» ЛТД. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://artelua.com/ua/obladnannya/frezernye-stanki-chpu-uk>

УДК 621.8

*Войтасик А. М., к.т.н., Бессараб Н. М.**Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, м. Миколаїв***ОСОБЛИВОСТІ РОЗРОБКИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ПОХИЛОГО СТІЧКОВОГО КОНВЕЄРА З ДОВЖИНОЮ ТРАНСПОРТУВАННЯ ВАНТАЖУ 12 М**

Стрічковий конвеєр – це механізм безперервної дії, призначений для транспортування вантажів, таких як корисні копалини, порода, закладальні матеріали та інші насипні або штучні вантажі [1]. Такий тип конвеєра є одним із найбільш поширених у промисловості завдяки своїй здатності ефективно переміщувати вантажі на різні відстані та висоти [2]. Основними компонентами стрічкового конвеєра є стрічка, що рухається по спеціальних барабанах, і електропривод, який забезпечує її рух [3]. Стрічка може бути виконана з різних матеріалів в залежності від умов експлуатації і типу транспортованого вантажу. Однією з головних переваг такого обладнання є його висока продуктивність, надійність і можливість налаштування до різних умов експлуатації [4].

Метою роботи є огляд конструктивних особливостей стрічкових конвеєрів, які застосовують електропривод та вибір певного варіанту для його подальшої розробки та реалізації.

Аналіз літератури [5, 6], свідчить, що стрічкові конвеєри належать до найбільш поширених видів транспортного обладнання, що застосовуються у найрізноманітніших галузях промисловості, логістики, аграрного сектору, будівництва та виробничих систем. Основним їх призначенням є забезпечення безперервного або періодичного переміщення широкого спектру вантажів – від штучних виробів, таких як ящики, мішки, пакунки, до сипучих та кускових матеріалів: піску, вугілля, зерна, будівельних сумішей тощо.

Проектування стрічкового конвеєра здійснюється з урахуванням таких параметрів, як маса, форма, габарити транспортованих об'єктів, вимоги до швидкості подачі, специфіка середовища експлуатації, характер маршруту транспортування та особливості монтажу обладнання [7]. В залежності від перерахованих чинників стрічкові конвеєри поділяються на кілька основних типів за конструктивною схемою, напрямком руху вантажу, мобільністю та функціональністю.

Серед найуживаніших типів виділяють горизонтальні, похилі, вертикальні, жолобчаті, поворотні, пересувні та комбіновані (змішаного типу) моделі [8]. Дані конвеєри можуть функціонувати як автономні одиниці технологічного процесу, так і як частина комплексних ліній з іншими механізмами – такими як бункери, дозатори, фасувальні агрегати, сортувальні вузли тощо. Кожен тип має власну конструктивну специфіку, експлуатаційні властивості та область застосування, що детально розглянуто нижче.

Горизонтальні або прямолінійні стрічкові конвеєри – це базовий варіант стрічкових транспортерів (рис. 1), що функціонує на основі гнучкої, безперервної стрічки. Стрічка переміщується між двома барабанами – приводним та натяжним, при цьому підтримується на проміжному етапі системою роликів, які забезпечують стабільність та рівномірний розподіл навантаження. Конструкція може бути виконана з різних матеріалів – гуми, поліуретану, полівінілхлориду (ПВХ) або металу – залежно від умов експлуатації та характеристик вантажу [9].



Рисунок 1 – Зовнішній вигляд горизонтального стрічкового конвеєра

Номінальна довжина таких конвеєрів може досягати 10 км, а продуктивність – до 25 т/год. Проте на практиці економічна доцільність і технічні обмеження значно звужують ці параметри. Вартість збільшується пропорційно до довжини, а складність обслуговування також зростає, що потребує додаткових витрат на монтаж, обслуговування та енергозабезпечення.

Найчастіше горизонтальні конвеєри застосовуються для транспортування продукції на логістичних складах, переробних підприємствах, фасувальних лініях, у сортувальних та виробничих системах, де потрібна надійна і передбачувана подача вантажів на одній висоті.

Похили стрічкові конвеєри функціонально аналогічні горизонтальним, однак мають принципову конструктивну відмінність – розташування стрічки під певним кутом нахилу до горизонту. Така особливість дозволяє ефективно переміщувати вантажі між різними рівнями – знизу догори або навпаки.

У більшості моделей передбачено фіксований або змінний кут нахилу, що забезпечується регульованим каркасом чи механізмом підйому. Рух стрічки забезпечується так само приводним барабаном, а правильне положення – натяжною системою [10]. Ефективність транспортування на похилих ділянках значною мірою залежить від матеріалу стрічки та наявності поперечних перегородок або шевронів, що запобігають сповзанню вантажу.

Похили конвеєри широко застосовуються на підприємствах різного профілю: у харчовій промисловості, сільському господарстві, будівництві, гірничодобувній галузі, а також у внутрішньоцехових системах. Універсальність такого обладнання дозволяє його експлуатацію як у приміщеннях, так і на відкритому повітрі.

Вертикальні конвеєри (рис. 2) використовуються переважно в умовах обмеженого простору, де потрібно швидко та ефективно транспортувати вантажі між рівнями при мінімальній площі розміщення обладнання. Такий конвеєр має стрічку, яка рухається вертикально або майже вертикально, забезпечуючи високу швидкість подачі.

На відміну від похилих моделей, вертикальні конвеєри можуть бути оснащені додатковими вантажними кишнями, ковшами або бортовими перегородками, що підвищує їхню ефективність у переміщенні вантажів без просипання. Основними сферами застосування є логістика, фармацевтика, харчова промисловість, складські комплекси.

Конструкція жолобчатих стрічкових конвеєрів передбачає наявність роликкоопор, розташованих під кутом, що формує стрічку у вигляді жолоба. Така форма стрічки сприяє централізованому переміщенню сипучих та кускових вантажів без розсипання і втрат, особливо при великих об'ємах.

Зазначений тип конвеєрів знайшов широке застосування у харчовій, аграрній, хімічній та будівельній промисловості. Наприклад, у зернохосвищах, млинах, комбикормових заводах, цементних комбінатах та ін. Висока надійність, тривалий строк служби та ефективність експлуатації роблять жолобчаті конвеєри незамінними у багатьох технологічних процесах.



Рисунок 2 – Зовнішній вигляд вертикального стрічкового конвеєра

Поворотні стрічкові конвеєри відрізняються наявністю рухомої опори або шарнірного механізму, який дозволяє змінювати напрямок переміщення вантажу. Завдяки цьому поворотні конвеєри здатні виконувати подачу матеріалу під різними кутами – 45°, 90°, 180° тощо, що робить їх дуже зручними у складних просторових умовах (рис. 1.5). Такі конвеєри особливо актуальні в харчовій, кондитерській, аграрній галузях, де виробничі лінії часто мають нестандартну конфігурацію. Завдяки гнучкості маршруту подачі вантажу поворотні системи можуть з'єднувати кілька технологічних етапів в одному ланцюгу, зменшуючи потребу в додатковому устаткуванні.

Мобільні або пересувні стрічкові конвеєри – це обладнання, конструкція якого передбачає наявність колісної або гусеничної бази, що дозволяє вільно переміщувати агрегат у межах об'єкта.

Завдяки цьому значно підвищується гнучкість у роботі, адже одне й те ж обладнання можна швидко перемістити до місця завантаження або розвантаження. Такі конвеєри особливо корисні при обслуговуванні складських зон, вантажно-розвантажувальних майданчиків, портів, залізничних станцій, а також при транспортуванні матеріалів безпосередньо з транспортних засобів. Їх використовують для переміщення широкого спектру вантажів – від легких пакунків до сипучих матеріалів великої маси.

Конвеєри змішаного або комбінованого типу (рис. 3) поєднують у своїй конструкції елементи кількох різних типів стрічкових транспортерів. Наприклад, у приміщеннях з обмеженою площею, де не можливо розмістити окремо горизонтальний і вертикальний конвеєр, доцільно використовувати Z-подібну або L-подібну конфігурацію обладнання. Таке поєднання дозволяє створювати компактні, але функціонально ефективні транспортні системи.



Рисунок 3 – Зовнішній вигляд стрічкового L-подібного конвеєра

Доцільним є також впровадження додаткових опцій: встановлення бортів для запобігання падінню вантажу, інтеграція з бункерами або завантажувальними пристроями, а також застосування регульованих опор, що забезпечують адаптацію до різної висоти подачі.

Висновки. В рамках виконання кваліфікаційної роботи запропоновано розробити електропривод похилого стрічкового конвеєра. Застосування такого типу конвеєра на виробництві дозволить забезпечити транспортування вантажу у вигляді гранульованого вапняку на довжину 12 м при застосуванні жолобчастого типу стрічки. Разом з тим, у подальшій роботі за наведеною темою, заплановано:

1. Розрахунки силової частини електропривода та швидкісних характеристик виконавчого електродвигуна.
2. Вибір складових елементів електрообладнання електропривода похилого стрічкового конвеєра.
3. Розробку 3D моделі його конструкції з детальним описом прийнятих технічних рішень.

Список використаних джерел

1. Баладінський В.Л., Лівінський О.М., Хмара Л.А. Будівельна техніка: навчальний посібник для студ. інж.-буд. спец. вищих навч. закладів. – К.: Либідь, 2001. – 368 с.
2. Баладінський В.Л., Назаренко І.І., Онищенко О.Г. Будівельна техніка. – К., 2002. – 462 с.
3. Полянський С.К. Будівельнодорожні та вантажопідіймальні машини. – К.: Техніка, 2001. – 624 с.
4. Григоров О.В., Петренко Н.О. Вантажопідіймальні машини: навчальний посібник. – Х.: НТУ «ХПІ», 2005. – 304 с.
5. Баладінський В.Л., Русан І.В., Гаркавенко О.М., Вольтерс О.Ю. Пристрої та механізми вантажопідіймних машин: навчальний посібник. – К.: КНУБА, 2005. – 132 с.
6. Лівінський О.М., Курок О.І., Пелевін Л.Є. Підйомно-транспортні та вантажно-розвантажувальні машини: підручник. – К.: «МП Леся», 2016. – 676 с.
7. Костинюк Л.Д., Мороз В.І., Паранчук Я.С. Моделювання електроприводів: навч. посібник. – Л.: Видавництво Національного Університету «Львівська політехніка», 2004. – 404 с.
8. ГОСТ 12.2.022-80 «Конвеєри. Загальні вимоги безпеки» [Електронний ресурс]. – 2025. – Режим доступу до ресурсу: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=90649 (дата звернення: 06.04.2025).
9. Будівельні норми і правила 2.05.07-91 «Промисловий транспорт» [Електронний ресурс]. – 2025. – Режим доступу до ресурсу: <https://budinfo.org.ua/doc/1807433/SNiP-2-05-07-91-Promislovii-transport> (дата звернення: 07.04.2025).
10. Будівельні норми і правила 2.09.03-85 [Електронний ресурс]. – 2025. – Режим доступу до ресурсу: <https://budinfo.org.ua/doc/1807446.jsp> (дата звернення: 09.04.2025).

УДК 621.8

*Войтасик А.М., к.т.н., Буравченко В.Є.**Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, м. Миколаїв***ОСОБЛИВОСТІ РОЗРОБКИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА СУДНОВОЇ ЛЕБІДКИ
ВАНТАЖОПІДЙОМНІСТЮ 3 Т**

Підвищення безпеки та зручності виконання вантажно-розвантажувальних операцій на водному транспорті є важливою складовою ефективної роботи суден [1, 2]. Для цього широко застосовуються суднові вантажопідіймальні механізми, серед яких лебідки займають провідне місце [3, 4]. Суднова лебідка дозволяє піднімати, опускати та утримувати вантажі заданої маси, що істотно спрощує виконання технічних і швартових робіт на борту [5, 6]. Встановлення електропривода забезпечує надійне та плавне керування лебідкою, покращуючи точність і швидкість вантажних операцій [7, 8]. Завдяки використанню електроприводних механізмів значно зменшуються фізичні навантаження на екіпаж і підвищується загальна продуктивність суднового комплексу.

Метою роботи є огляд конструктивних особливостей суднових лебідок, які застосовують привод та вибір певного варіанту для його подальшої розробки та реалізації.

Аналіз літератури [9, 10], свідчить, що лебідки класифікують за призначенням, типом приводу та умовами експлуатації [11]. Постійний розвиток технологій дозволяє виробникам удосконалювати ці механізми, підвищуючи їхню надійність, продуктивність і безпеку, особливо в складних морських умовах. Знання сучасних рішень у цій сфері є важливим для спеціалістів, що займаються проєктуванням, виготовленням і впровадженням лебідкових систем.

Швартовні лебідки призначені для закріплення судна біля причалу чи іншого судна, забезпечуючи його стійке положення під час стоянки, завантаження або розвантаження (а, рис. 1). Вони поділяються на два основні типи:

- 1) Ручні лебідки – обслуговуються безпосередньо людиною, зазвичай застосовуються на малих суднах, де зусилля незначні.
- 2) Електричні лебідки – оснащені електроприводами, призначені для великих суден, де потрібна велика сила тяги. Такі механізми забезпечують точне та безпечне керування процесом швартування.

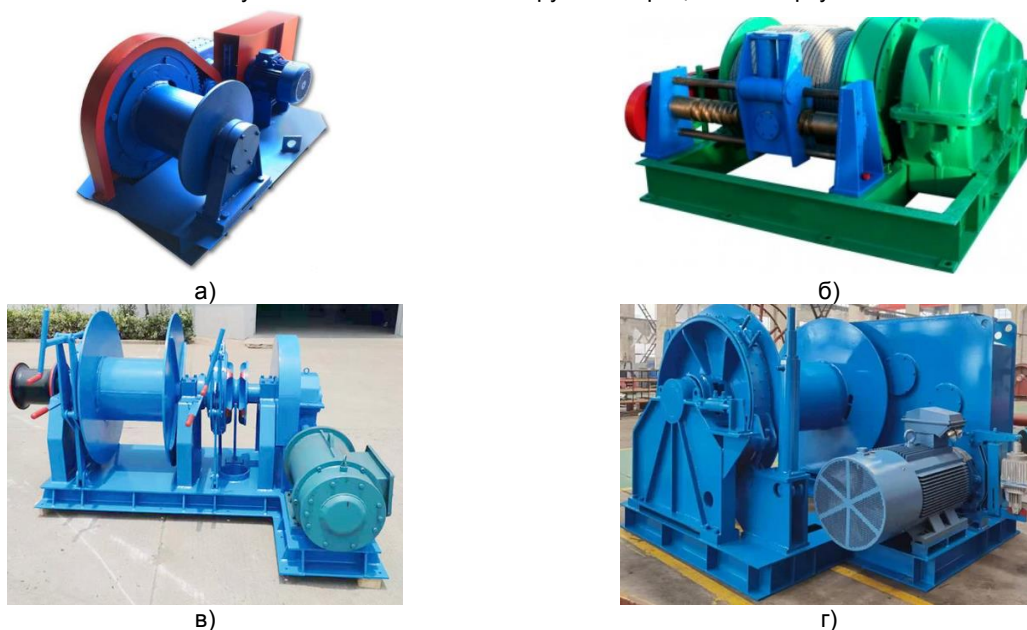


Рисунок 1 – Зовнішній вигляд електроприводних лебідок:
а) – швартовна; б) – буксирувальна; в) – якірна ; г) – палубна.

Буксирувальні лебідки призначені для переміщення суден або об'єктів по воді, працюючи під значними навантаженнями (б, рис. 1). Вони обладнані посиленими системами безпеки, гальмування та контролю, що дозволяють витримувати великі тягові зусилля та стабільно функціонувати в складних умовах. Такі лебідки зазвичай мають інтегровані системи моніторингу навантажень і передачі даних у реальному часі.

Основні типи буксирувальних лебідок:

- 1) Однобарабанні – використовуються для нескладних буксирувальних операцій, мають один барабан і просту конструкцію.
- 2) Двобарабанні – забезпечують більший контроль над процесом та дозволяють працювати з кількома тросами, що важливо для складних завдань.
- 3) Гідравлічні – оснащені приводами, що створюють високий крутний момент, і надійно справляються з великими навантаженнями, переважно застосовуються на потужних буксирувальних суднах.

Якірні лебідки (брашпілі) призначені для опускання та підйому якорів суден (в, рис. 1). Вони повинні мати високу міцність і здатність працювати з великими ваговими навантаженнями. Основні типи:

1) Ручні – застосовуються на малих суднах для легких якорів, обслуговуються вручну.

2) Електричні – моторизовані, використовуються на середніх і великих суднах, забезпечують більший контроль і зусилля.

3) Гідравлічні – встановлюються на комерційних та спеціалізованих суднах, відзначаються високою потужністю й витривалістю для важких умов.

Кабельні лебідки – це вертикальні механізми, призначені для швартування та якорування суден. Вони розміщуються на палубі та часто працюють у парі з іншими лебідковими системами, підвищуючи точність і надійність операцій.

Залежно від потужності та розмірів судна, кабельні лебідки можуть бути:

1) Електричними – для середніх і малих суден.

2) Гідравлічними – для великих кораблів, де потрібна підвищена сила та витривалість.

Палубні лебідки встановлюються на палубі суден і виконують широкий спектр завдань: від вантажно-розвантажувальних робіт до якірних і буксирувальних операцій (г, рис. 1). Вони можуть мати електричний, гідравлічний або ручний привід, що дозволяє адаптувати їх під конкретні умови роботи.

Такі лебідки активно застосовуються на вантажних, риболовецьких і військових суднах, забезпечуючи надійне кріплення, підйом і переміщення вантажів.

В рамках кваліфікаційної роботи запропоновано розробити електропривод саме палубної вантажної суднової лебідки здатної обробляти вантажі масою до 3 т. Основним параметром вантажної лебідки є вантажопідйомність, яка визначає максимально допустиму вагу вантажу. Важливою також є швидкість підйому, що змінюється залежно від маси вантажу. Для легких вантажів швидкість становить 0,5 – 1,5 м/с, для середніх – 0,25 – 0,6 м/с, для важких – 0,12 – 0,3 м/с.

Запуск лебідки здійснюється увімкненням електродвигуна, одночасно з чим розблоковується колодкове гальмо. Обертання двигуна передається на провідний вал і барабан через зубчасту муфту та сателіти, що взаємодіють із зубчастим вінцем барабана та плаваючими вінцями. Це у свою чергу, забезпечує обертання барабана і підйом вантажу. Регулювання швидкості відбувається перемиканням режимів двигуна.

Для утримання вантажу та безпеки при швартуванні використовується стрічкове гальмо барабана, а колодкове гальмо запобігає зворотному обертанню при знеструмленні. Мастило підшипників і зубчастих передач здійснюється оливою, залитою всередину барабана, що забезпечує безперервне змащення.

Перед початком роботи вантажні стріли встановлюються у робоче положення, що потребує часу та обмежує можливість приймання вантажу лише в одну точку трюму. Для спрощення цього процесу стріли оснащують топенантними лебідками з ручним або електроприводом, які дозволяють змінювати виліт стріли без зупинки роботи. Назва таких лебідок походить від топенантного троса, намотаного на барабан.

Висновки. В рамках виконання кваліфікаційної роботи запропоновано розробити електропривод суднової лебідки вантажопідйомністю 3 т. Застосування такої лебідки забезпечить реалізацію режимів вибирання/травлення вантажного тросу зі швидкістю 0,7 м/с при виконанні вантажно-розвантажувальних робіт на палубі судна. Разом з тим, у подальшій роботі за наведеною темою, заплановано:

1. Розрахунки силової частини електропривода та швидкісних характеристик виконавчого електродвигуна.
2. Вибір складових елементів електрообладнання електропривода суднової лебідки.
3. Розробку 3D моделі його конструкції з детальним описом прийнятих технічних рішень.

Список використаних джерел

1. Shuo L., Yi L. Finite element analysis for the stability of marine winch system. *Journal of coastal research*, 2025, 110 (1), DOI: 10.2112/JCR-S110-042.1.
2. Liao W., Zhao Y., Liu D., Jin Y. Active heave compensation active disturbance rejection control system of electric driven marine winchs. *Zhongguo Jixie Gongcheng / China mechanical engineering*, 2018, 29(24), 2999-3008. DOI: 10.3969/j.issn.1004-132X.2018.24.015.
3. Berg T.E., Selvik O., Indergård R., Ringen E. Maritime emergency preparedness – drifting ships. *IOP conference series materials science and engineering*, 2023, 1288(1):012001. DOI: 10.1088/1757-899X/1288/1/012001.
4. Tiancai X., Liangpei H., Yong G. Modeling and simulation analysis of active heave compensation control system for electric-driven marine winch under excitation of irregular waves. *Measurement and control*, 2023, 56(24), 002029402211016. DOI: 10.1177/00202940221101666.
5. Martelli M., Viviani M., Altosole M. Numerical modelling of propulsion, control and ship motions in 6 degrees of freedom. *Engineering for the maritime environment*, 2014; 228(4), 373–397.
6. Huang W., Binbin L., Kim D.K. An investigation on material diversity of synthetic fiber ropes in the course stability of towing under wind. *Ocean engineering*, 2023, 279(2):114410. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2023.114410.
7. Haoran Y., Wenhua L., Shanying L., Qingtao L., Dinghua Zh. Load assessment method for multi-layer oceanographic winch with synthetic fibre ropes based on non-rotation symmetric cylindrical model. *Journal of marine science and engineering*, 2024, 12(3), 409. DOI: 10.3390/jmse12030409.

8. Reidar A.S., Henry P., Sverre T., Mette L.N., Vilmar E. Experimental investigation of stresses in winch drums subjected to multilayer spooling loads from synthetic fibre ropes. *ASME 2019 38th International conference on ocean*, 2019. DOI: 10.1115/OMAE2019-95283

9. Kongde H., Meng W., Shaopeng L., Weihua Y., Gongfa L. Dynamic characteristics analysis and safety evaluation of lifting mechanism for winch ship lift. *Journal of the Brazilian society of mechanical sciences and engineering*, 2025, 47(3). DOI: 10.1007/s40430-025-05442-y.

10. Zhang L., Wenjie L., Zhe D., Lei D., Xiaobin L. Speed and heading control-based collision avoidance for a ship towing system. *ISA Transactions*, 2022, 135(4). DOI: 10.1016/j.isatra.2022.10.010.

11. Лівінський О.М., Курок О.І., Пелевін Л.Є. Підйомно-транспортні та вантажно-розвантажувальні машини: навч. посібник. – К.: «МП Леся», 2016. – 676 с.

УДК 621.8

Войтасик А. М., к.т.н., Гоцуленко Я. В.

Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, м. Миколаїв

ОСОБЛИВОСТІ РОЗРОБКИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА МОСТОВОГО КРАНА ВАНТАЖОПІДЙОМНІСТЮ 5 Т

Функціональність вантажопідіймальних машин наповнюється різноманітними механізмами, які значно впливають на загальну продуктивність даних установок [1, 2]. Вантажопідіймальна машина, оснащена цілою низкою механізмів, здатна ефективно обробляти вантажі, які розташовані на значних відстанях, що забезпечує безперебійну та продуктивну роботу крана на великих площах [3, 4]. Мостові крани знайшли широке застосування як у закритих складських приміщеннях, так і на відкритих промислових територіях, виконуючи підйом/спуск та переміщення вантажів із різних площадок [5, 6]. У повному функціоналі такі машини обладнані трьома основними механізмами: перший механізм відповідає за підйом/спуск вантажів, другий – за переміщення вантажного візка, а третій – за пересування самого крана по рейках [7, 8]. Серед методів забезпечення роботи зазначених механізмів, електроприводи змінного струму є найбільш поширеними та популярними. Вони забезпечують надійність та ефективність в роботі, що дозволяє підвищити загальний рівень продуктивності [9].

Метою роботи є огляд конструктивних особливостей електроприводних механізмів мостових кранів та вибір певного варіанту для його подальшої розробки та реалізації.

Аналіз літератури [10, 11], свідчить, що механізми мостового крана – це пристрої, що забезпечують стабільну роботу вантажопідйомної техніки, а саме захоплення, підняття/спуск вантажу, переміщення самого крана, систему гальмування, методи керування та безпеку в робочому процесі [12]. Необхідність застосування певних механізмів залежить від технічних характеристик крана [13, 14].

Мостові крани відносяться до категорії найпопулярніших вантажопідйомних пристроїв (рис. 1). Вони використовуються у будівництві, у ремонтних цехах та на виробництві для транспортування габаритних об'єктів. Мостові крани понад міцні та надійні, при цьому доступні та прості в експлуатації.



Рисунок 1 – Зовнішній вигляд мостового двобалочного крана

Залежно від способу кріплення типу привода і конструктивних особливостей розрізняють такі види мостових кранів.

За типом виконання мосту крана:

1) однобалочні – здебільшого мобільні та економічні у використанні, легка конструкція з невеликою вантажопідйомністю (до 20 т). Затребовані на невеликих площах, приміщеннях, складах, будівельних об'єктах;

2) двобалочні – мають значно більшу продуктивність, ніж однобалочні, вантажопідйомність сягає 100 т і більше.

Щодо вантажопідіймального пристрою:

1) електричний – переміщення моста відбувається за допомогою електродвигуна, вантажопідйомну функцію виконують тельфера або лебідки, залежно від вантажу, що піднімається. Електричні мостові крани необхідні в умовах інтенсивної роботи та переміщення великої кількості вантажів;

2) ручний – задіяні ручні механізми, призначені для підняття відносно не важких вантажів, відмінно підходить для роботи в приміщенні та цеху. Чи не дорогі в обслуговуванні. Підйом ваги здійснюється за рахунок ланцюгової талі.

За типом конструкції:

1) опорний – переміщається по надземних рейкових коліях. Таке обладнання просто у використанні та забезпечує максимальну вантажопідйомність (до 100 т і вище);

2) підвісний – переміщається двотавром, який кріпиться на стінах і перекриттях у будівлі, обмежений підйомом маси до 20 т.

Механізм пересування включає електродвигун мостового крана, який взаємодіє через редуктор з ходовою частиною, забезпечений ходовими колесами (привідними і непривідними) (рис. 2). Пересування мостового крана відбувається підкрановими шляхами. Підкрановий шлях, на кшталт опори, буває опорним (для опорних конструкцій) і підвісний (для мостових підвісних кранів). З огляду на це, розрізняють рейковий або балковий підкрановий шлях. Як правило, для підкранових шляхів опорного крана використовують рейкові балки або повнотілий квадрат, якщо маса об'єкта, що переміщується, понад 20 т – спеціальні кранові рейки (рис. 1.3). Для шляхів підвісного типу кранів використовуються балки типу М.



Рисунок 2 – Зовнішній вигляд механізму пересування мостового крана

Головною метою встановлення гальма мостового крана є зупинка рухомих механізмів (стопорні), утримання предмета, що переміщається на вазі і плавний його спуск, регулювання швидкості переміщення (спускні гальма). Гальма виконують відповідальну роль, оскільки працюють у режимі підвищеного навантаження, адже у робочому процесі на них припадає значна кількість зупинок та пусків.

Розрізняють такі типи гальмівного механізму мостового крана: колодочні та диско-колодкові – одні з найчастіше використовуваних керованих нормально замкнених гальм. Прості в установці та експлуатації. Роль приводного пристрою виконує електрогідролічний штовхач (як правило, вже включений в його конструкцію).

Гідролічні – найчастіше використовуються в гальмівному механізмі кранової лебідки. Вони безпечні в експлуатації, відрізняються швидкістю відгуку команди керування.

Електромагнітні – порошкові, нормально розімкнені гальма. Використовуються в парі із нормально замкнутими, що продовжує період роботи гальмівної системи в цілому, а також складових привода.

Гальма є відкритого та закритого видів:

1) відкритий – діє тільки при натисканні на важіль, а в звичайному стані не чинить опору роботі механізму, з яким він взаємодіє;

2) закритий – знаходиться в замкнутому стані, перешкоджає руху конструкції, що відноситься до нього, доки не буде натиснутий гальмівний важіль і механізм розгальмовується.

Вантажопідіймальний пристрій обладнаний закритими гальмами (рис. 3). Вони, як правило, надійніші від відкритих і простіші в обслуговуванні (пошкодження легко виявити). Один із головних вузлів мостового крана – вантажопідіймальний механізм, саме він реалізує головне завдання конструкції – доставка предмета на певну висоту. Механізм підйому розміщений безпосередньо на каретці, розрахований на різні вагові навантаження.

Елементи вузла, що складають: електричний двигун мостового крана з приводом, трансмісійні вали, горизонтальний редуктор, вантажний канат, барабан. Залежно від привода підйомного механізму їх поділяють на ручні та електричні. Підйом ваги здійснює електроталь (тельфер), а для руху самої машини використовуються електронні мотор-редуктори ходових коліс.



Рисунок 3 – Зовнішній вигляд вантажопідіймального механізму

Висновки. В рамках виконання кваліфікаційної роботи запропоновано розробити електропривод мостового крана вантажопідіймністю 5 т. Застосування такого крана дозволяє автоматизувати процес обробки вантажів на територіях сучасних складських приміщень або виробничих ділянок. Разом з тим, у подальшій роботі за наведеною темою, заплановано:

1. Розрахунки силової частини електропривода та швидкісних характеристик виконавчих електродвигунів.
2. Вибір складових елементів електрообладнання електропривода мостового крана.
3. Розробку 3D моделі його конструкції з детальним описом прийнятих технічних рішень.

Список використаних джерел

1. Molnár D., Blatnický M., Dižo J. Comparison of analytical and numerical approach in bridge crane solution. *Manufacturing technology*, 2022, 22(3). DOI: 10.21062/mft.2022.018
2. Li W., Ruigang Y., Qisong Q., Guangli Zh. Reliability and sensitivity analysis of bridge crane structure. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2022, 36(9). DOI: 10.1007/s12206-022-0807-1
3. Hrabovský L., Čepica D., Frydryšek K. Detection of mechanical stress in the steel structure of a bridge crane. *Theoretical and applied mechanics letters*, 2021, DOI: 10.1016/j.taml.2021.100299
4. Haojie L., Xuyang L. Data-driven active learning control for bridge cranes. *Mathematical and computational applications*, 2023, 28(5):101. DOI: 10.3390/mca28050101
5. Lei T., Zhong T., Shu W., Yufei H. Condition monitoring method for bridge crane equipment based on bim technology and bayesian theory. *Advances in intelligent systems, computer science and digital economics IV*, 2023. DOI: 10.1007/978-3-031-24475-9_55
6. Haizhou L., Xianghua M., Yinzhong Y. Energy coupling control of bridge crane based on adaptive fuzzy strategy. *Journal of physics conference series*, 2023, 2479(1):012055. DOI: 10.1088/1742-6596/2479/1/012055
7. Проць Я.І., Савків В.Б., Шкодзінський О.К., Ляшук О.Л. Автоматизація виробничих процесів: навчальний посібник. – Тернопіль: ТНТУ ім. І.Пулюя, 2011. – 344с.
8. Цвіркун Л.І., Грулер Г. Робототехніка та мехатроніка: навчальний посібник. – Дніпро: НГУ, 2017. – 224 с.
9. Проць, Я.І. Захоплювальні пристрої промислових роботів: навчальний посібник. – Тернопіль: ТДТУ ім. І. Пулюя, 2008. – 232 с.
10. Loveikin V.S., Romasevych Y. Optimization of bridge crane movement control. *Science & Technique*, 2018, 17(5):413-420. DOI: 10.21122/2227-1031-2018-17-5-413-420
11. Musílek J. Dynamical model for calculation transverse forces between overhead bridge crane and crane runway. *IOP conference series materials science and engineering*, 2020, 728(1):012001. DOI: 10.1088/1757-899X/728/1/012001
12. Yanyang L., Renxing L., Tianle L., Chenmin L., Tianlei W., Yuebang H. An enhanced coupling optimal trajectory planning for bridge cranes. *Journal of mechanical engine*, 2023. DOI: 10.1177/09544062231190797
13. Jun M., Qiao W., Ying Zh., Hongxiao W. Research on variable universe fuzzy multi-parameter self-tuning PID control of bridge crane. *Applied sciences*, 2023, 13(8):4830. DOI: 10.3390/app13084830
14. Tianlei W., Nanlin T., Jiongzhi Q., Zhaoming Zh., Chengmin L., Hongmin W. A novel model-free adaptive terminal sliding mode controller for bridge cranes. *Measurement and control*, 2023, 56(7-8):1217-1230. DOI: 10.1177/00202940221143851

УДК 621.8

*Войтасик А. М., к.т.н., Клименко В. С.**Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, м. Миколаїв***ОСОБЛИВОСТІ РОЗРОБКИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА КОНСОЛЬНО-ПОВОРОТНОГО КРАНА
ВАНТАЖОПІДЙОМНІСТЮ 2,5 Т**

Вантажопідіймальні електроприводні механізми часто використовуються під час виконання ремонтних робіт у майстернях [1, 2]. Вони забезпечують ефективне піднімання і переміщення важких предметів, що спрощує процес ремонту [3, 4]. Одним з найбільш популярних різновидів подібного обладнання є консольно-поворотні крани, які добре зарекомендували себе в таких умовах [5]. Такі крани дозволяють з легкістю маневрувати в обмеженому просторі [6]. Завдяки своїй конструкції, консольно-поворотні крани здатні обслуговувати значні площі. Їх електроприводна система забезпечує швидкість і точність підйому вантажів [7]. При виконанні ремонтних робіт такі механізми дозволяють уникати фізичних навантажень для працівників.

Метою роботи є огляд конструктивних особливостей сучасних кранових механізмів, які застосовують електропривод та вибір певного варіанту для його подальшої розробки та реалізації.

Аналіз літератури [8, 9], свідчить, що застосування консольно-поворотних кранів має велике значення в сучасній промисловості, адже їх основною метою є виконання малих вантажопідіймальних завдань. Дані механізми стали незамінними помічниками у багатьох виробничих процесах завдяки їхній можливості застосовуватися при різних умовах роботи [10]. Наприклад, у ситуаціях, коли простір обмежений, консольно-поворотні крани демонструють добрі результати при проведенні завантажувальних і розвантажувальних операцій, що не лише полегшує фізичну працю, але й значно підвищує загальну ефективність робочих процесів, оскільки скорочує час, необхідний для переміщення вантажів, а також знижує ризик пошкоджень.

Конструкція консольно-поворотних кранів складається з кількох елементів, які разом забезпечують їхню функціональність та надійність (рис. 1). По-перше, є консоль, яка виступає в якості опорної частини. Консоль є необхідною, оскільки визначає функціональність всієї системи. Далі йде вертикальна колона, яка забезпечує стійкість і підйом, що є основою для всіх подальших дій. Платформа, на якій відбувається переміщення вантажів, також важлива, оскільки саме на ній безпосередньо здійснюється підйом і спуск вантажів.

Крім того, важливою складовою є поворотний опорний підшипник, який дозволяє змінювати напрямок руху консолі, що в свою чергу, дозволяє оператору більш точно і ефективно маневрувати з вантажем, а це суттєво в обмежених просторах. В якості підйомного елемента може використовуватися вантажопідіймний канат або ланцюг. Вони повинні бути міцними та надійними, щоб забезпечити безпеку операцій. Передбачення в конструкції опорного кронштейна дозволить забезпечити міцність і стабільність всієї конструкції при загальному функціонуванні крана.

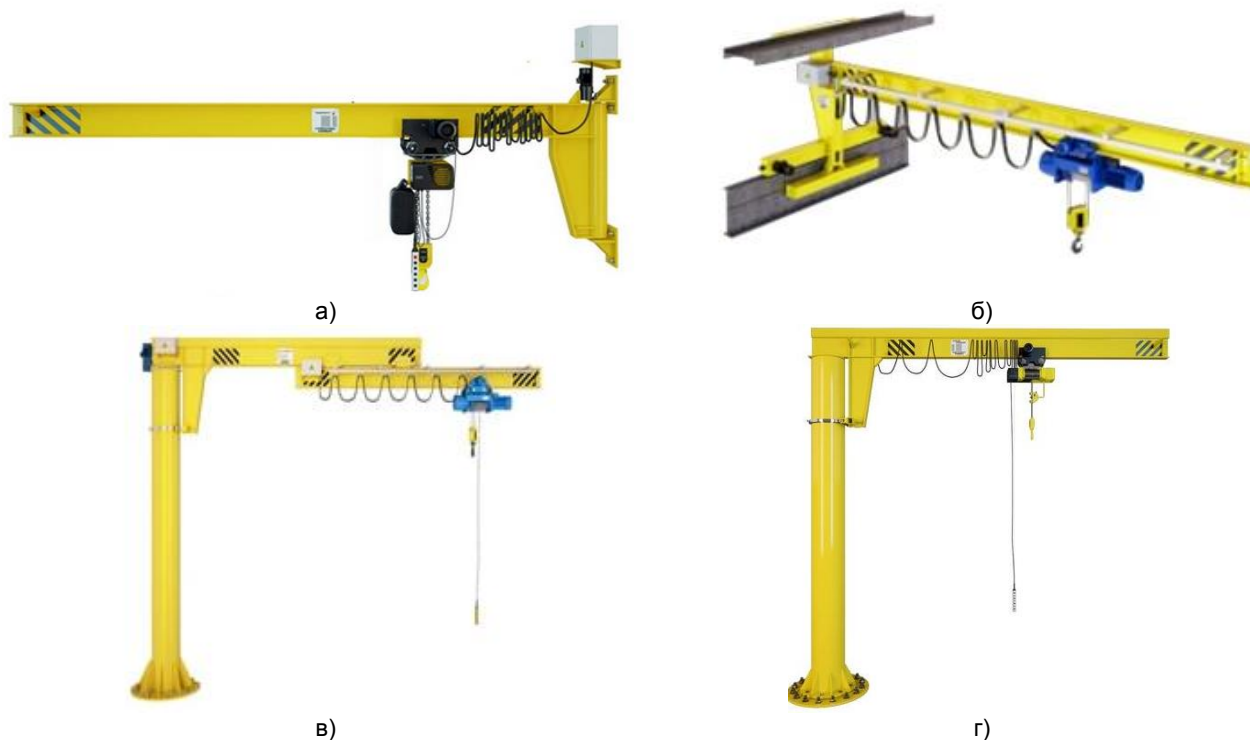


Рисунок 1 – Різновиди консольно-поворотних кранів:
а) – настінний; б) – пересувний; в) – телескопічний; г) – Г-подібний

Консольно-поворотні крани можуть бути представлені в двох формах: мобільній та стаціонарній. Нерухомі моделі надійно фіксуються на підлозі або на стіні. Настінний варіант крана демонструє високу надійність та витривалість, що робить його ідеальним вибором для різних робочих умов. Крани, які закріплюються відносно стіни, широко використовуються для виконання завдань на обмежених ділянках. У неробочому режимі консоль можна наблизити до стіни, що звільняє додатковий простір для інших потреб.

Пересувні конструкції обладнані міцними несучими рамками з колесами, що забезпечує легкість у переміщенні. Особливо зручно це для тих, хто потребує мобільності та можливості швидко змінювати місце роботи. Завдяки такій універсальності та ефективності, такі системи стають надзвичайно корисними в багатьох сферах діяльності, де важливим є забезпечення зручності та функціональності. Технічні характеристики вантажопідіймального обладнання, які слугують основою для проектування актуальних зразків консольно-поворотних кранів, можуть бути різноманітними, проте зазвичай усі вони мають спільні параметри, що визначають їхні можливості та функціональність. Наприклад, максимальна вантажопідйомність варіюється в межах від 0,5 до 16 т, що дозволяє використовувати обладнання для різних завдань у галузі транспортування та підйому/спуску важких предметів. Виліт стріли, який досягає до 5 м, забезпечує зручність у виконанні робіт на відстані, що може бути корисним у складних умовах.

Висота, на яку можливо підняти вантаж, становить до 8 м, що також сприяє ефективному виконанню завдань на будівельних майданчиках та в інших сферах. Відстань від осі повороту консолі може коливатися від 2,7 до 5,2 м, що додає маневреності та гнучкості в роботі з обладнанням. Діаметр вертикальної колони, як правило, не перевищує 1,3 м і при цьому забезпечується стабільність конструкції під час експлуатації. Щодо типу привода, можливі варіанти з ручним або електричним механізмом, що дозволяє вибрати оптимальне рішення залежно від потреб конкретного проекту.

У більшості випадків вантажопідіймальне обладнання комплектується платформою для переміщення, що підвищує зручність у використанні. Моделі, які не обладнані електроталіями, здатні піднімати вантажі до 3,2 т, що робить їх відмінним вибором для легших завдань, коли електрична підтримка не є необхідною.

Згідно з класифікацією ГОСТ 25546-82, крани, що відносяться до категорії консольно-поворотних кранів, належать до робочої групи 2К [11]. Дана категорія обладнання спеціально розроблена для експлуатації в закритих приміщеннях, що дозволяє забезпечити безпечні умови роботи. Керування функціями крана здійснюється через дистанційний пульт, який підключений до платформи переміщення за допомогою гнучкого кабелю. Для підвищення зручності існує можливість оснащення дистанційним керуванням, яке працює за радіоканалом, і дозволяє оператору контролювати процеси на відстані.

Виліт стріли, який має кран, впливає на визначення довжини робочої зони, особливо для стаціонарних моделей. Такий параметр впливає на здатність виконувати різноманітні завдання в межах конкретного простору. Щодо механізму підйому/спуску вантажів, у разі потреби може бути встановлений обмежувач вантажопідйомності, який підвищує безпеку експлуатації та захищає обладнання від перевантажень.

Поворот консолі крана має дві можливості: повний оберт на 360 градусів або обмежений на 240 градусів для моделей, які кріпляться до стіни. Зазначена особливість дозволяє адаптувати кран до різних умов роботи, забезпечуючи його ефективність у тісних приміщеннях. Під час проведення заводських випробувань статичні навантаження тестуються в співвідношенні 1:1,25 від базових можливостей кранового обладнання, що забезпечує високу надійність. Динамічні навантаження оцінюються за співвідношенням 1:1, що також підтверджує якість та міцність конструкції.

Висновки. В рамках виконання кваліфікаційної роботи запропоновано розробити електропривод консольно-поворотного крана вантажопідйомністю 2,5 т. Реалізація такого крана дозволить його використовувати під час виконання вантажних операцій у майстерні при проведенні ремонтних робіт електротехнічного устаткування. Разом з тим, у подальшій роботі за наведеною темою, заплановано:

1. Розрахунки силової частини електропривода та швидкісних характеристик виконавчих електродвигунів.
2. Вибір складових елементів електрообладнання електропривода консольно-поворотного крана.
3. Розробку 3D моделі його конструкції з детальним описом прийнятих технічних рішень.

Список використаних джерел

1. Molnár D., Blatnický M., Dižo J. Comparison of analytical and numerical approach in bridge crane solution. *Manufacturing technology*, 2022, 22(3). DOI: 10.21062/mft.2022.018
2. Shufang W., Tiexiong S. Optimization design of cantilever beam for cantilever crane based on improved GA. *Indonesian journal of electrical engineering*, 2014, 12(4). DOI: 10.11591/telkomnika.v12i4.4807
3. Lei T., Zhong T., Shu W., Yufei H. Condition monitoring method for bridge crane equipment based on bim technology and bayesian theory. *Advances in intelligent systems, computer science and digital economics IV*, 2023, DOI: 10.1007/978-3-031-24475-9_55
4. Čolić M., Pervan N., Delić M., Muminovic A., Odžak S., Hadžiabdić V. Mathematical modelling of bridge crane dynamics for the time of non-stationary regimes of working hoist mechanism. *Archive of mechanical engineering*, 2022, 69(2), P. 189-202. DOI: 10.24425/ame.2022.140415
5. Aliev A.R., Mamedov Dz., Abdullaev G. Development of mathematical support for the accuracy of selecting the crane-manipulator technical properties of the mechanical assembly site. *Transport engineering*, 2023, (6), P. 21-31. DOI: 10.30987/2782-5957-2023-6-21-31

6. Haizhou L., Xianghua M., Yinzong Y. Energy coupling control of bridge crane based on adaptive fuzzy strategy. *Journal of physics conference series*, 2024, 2479(1), P. 012055. DOI: 10.1088/1742-6596/2479/1/012055
7. Jian Y., Shengfang Zh., Yuchen L., Zhihua Sh., Fujian M., Dapeng Y., Dongfang Y. Structural topology optimization of cantilever crane boom based on equivalent moving load method. *IOP Conference series materials science and engineering*, 2019, 692(1), P. 012020. DOI: 10.1088/1757-899X/692/1/012020
8. Лівінський О.М., Курок О.І., Пелевін Л.Є. Підйомно-транспортні та вантажно-розвантажувальні машини: підручник. – К.: «МП Леся», 2016. – 676 с.
9. Баладінський В.Л., Русан І.В., Гаркавенко О.М., Вольтерс О.Ю. Пристрої та механізми вантажопідйомних машин: навчальний посібник. – К.: КНУБА, 2005. – 132 с.
10. Yao H.Zh., Cunbao Zh., Shi T.Ch. New type of cantilever crane for high-speed railway track plate constructions. *Advanced materials research*, 2010, P. 97-101. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.97-101.4474
11. ГОСТ 25546-82 «Крани вантажопідйомні. Режим роботи» [Електронний ресурс]. – 2025. – Режим доступу до ресурсу: <http://um.co.ua/8/8-4/8-4920.html> (дата звернення: 10.04.2025).

УДК 681.5

Рачинський А.В., аспірант кафедри автоматики, Білюк І.С., к.т.н., доцент кафедри автоматики, Савченко О.В. викладач кафедри автоматики

Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, м. Миколаїв

ОСОБЛИВОСТІ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕНЕРГІЇ У ХВИЛЬОВИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЯХ

Одним з найбільш розповсюджених пристроїв для отримання електричної енергії з енергії хвиль є хвильові електростанції (ХвЕС). Хвильові електростанції – перспективне джерело екологічно чистої енергії, розробці яких приділяється велика увага. Створення ХвЕС визначається вибором оптимальної конструкції станції відповідно до умов акваторії використання [1].

Сучасні ХвЕС використовують для своєї роботи наступні основні перетворювачі енергії хвиль [2, 3]:

- перетворювачі з коливальними елементами ("качка" Солтера, пліт Коккерела);
- пристрій ОВС (осцилююча водяна колона), в якому енергія водяного стовпа, що змінює свою висоту під впливом морських хвиль, створює гідравлічний або повітряний потік, що направляється на турбіну Уеллса;
- індукційні хвильові генератори у вигляді точкових буїв (електромагнітні буї);
- підводні буї, що перетворюють енергію хвиль на електричну за допомогою лінійного генератора (AWS – Архімедів хвильовий маятник);
- гідропневматичні перетворювачі (пневмобуй Масуди);
- пристрої TAPCHAN та Wave Dragon, що працюють за рахунок переливу і явища екстракції (посилення) енергії води з наступним проходом через низьконапірну турбіну;
- спіральний плаваючий ротор як енергопоглинаючий елемент.

Метою роботи моделювання процесів перетворення енергії у електромеханічному перетворювачі ХвЕС типу гідравлічної турбіни.

Основне динамічне рівняння, на основі якого будується модель, має вигляд

$$J(d\omega/dt) = T_m - T_g - k_{тр}\omega,$$

де J – момент інерції, T_m – механічний момент гідротурбіни хвильової електростанції, T_g – електромагнітний момент генератора, $k_{тр}$ – коефіцієнт тертя гідротурбіни, ω – частота обертання.

На рисунку 1 представлена структурна схема хвильової електростанції.

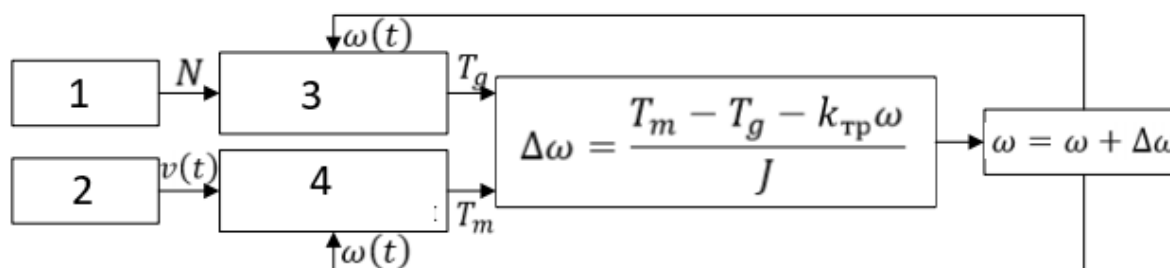


Рисунок 1 – Структурна схема хвильової електростанції:

1 – навантаження; 2 – потік води; 3 – модель генератора; 4 – модель гідротурбіни.

Момент інерції гідротурбіни хвильової електростанції складається з моментів інерції ротора генератора та колеса, що у свою чергу складається з моментів інерцій лопатей. Так як діаметр ротора генератора значно

менший за діаметр гідроколеса, то момент інерції останнього є визначальним до розрахунку моменту інерції гідротурбіни.

Таким чином, імітаційна модель має вигляд представлений на рисунку 2.

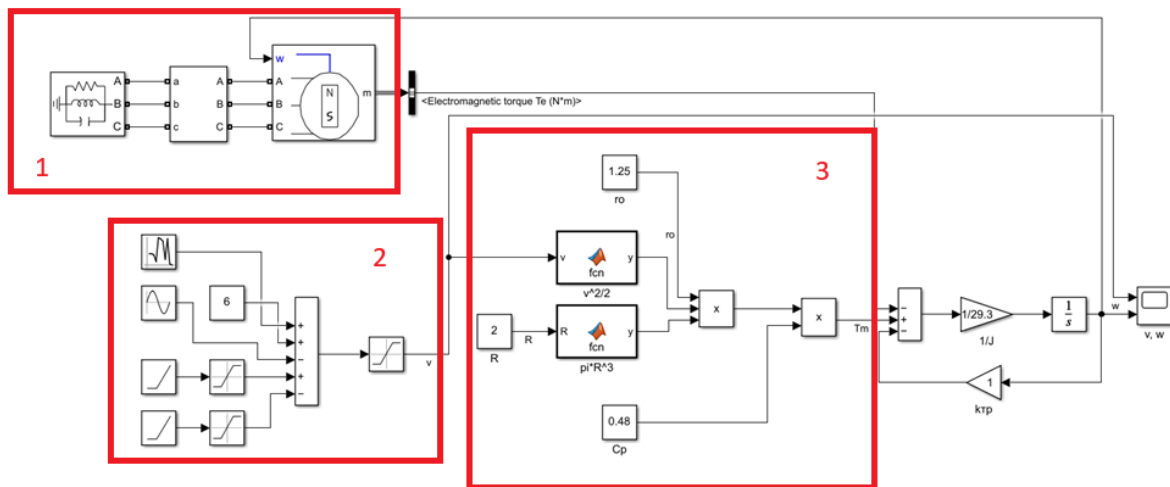


Рисунок 2 – Імітаційна модель ХвЕС:

1 – модель генератора з навантаженням; 2 – модель руху потоку води; 3 – модель гідротурбіни

Результати імітаційного моделювання представлено на рисунку 3.

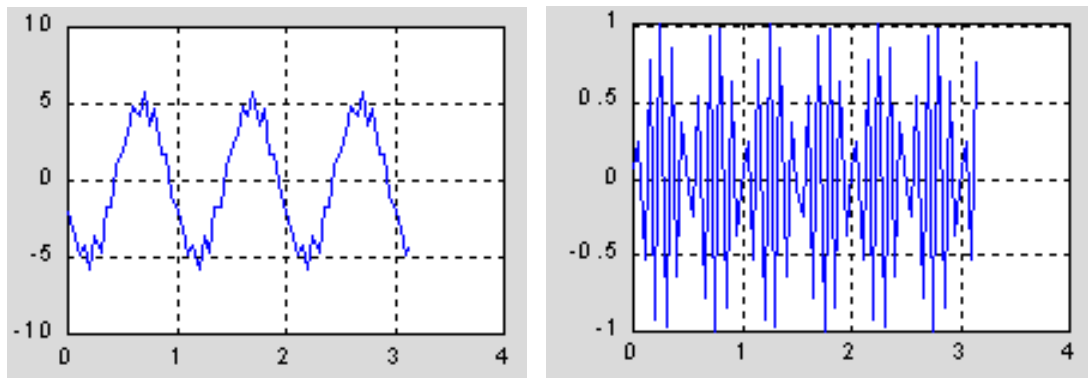


Рисунок 3 – Результати імітаційного моделювання ХвЕС

Висновки. Запропонована модель на відміну від існуючих дозволяє аналізувати роботу хвильової електростанції в залежності від зміни параметрів потоку води, що проходить через неї. Також ця модель дозволяє оцінити ефективність хвильової електростанції в залежності від розмірів та геометрії колеса гідротурбіни.

Список використаних джерел

1. Joao Cruz Ocean Wave Energy: Current Status and Future Perspectives. – Springer, 2008. – 431 pages.
2. Ocean Energy Strategic Roadmap 2016, building ocean energy for Europe. Ocean Energy Forum. 2016 [Electronic resource], 2016
URL: https://webgate.ec.europa.eu/maritimeforum/sites/maritimeforum/files/OceanEnergyForum_Roadmap_Online_Version_08Nov2016.pdf/
3. Блинцов В. С. Основные направления повышения энергетической эффективности волновых электростанций [Текст] / В. С. Блинцов, Нгуен Тхань Хай // Сборник научных трудов НУК. – 2010. – Т. 435, № 6. – С. 122–130.

УДК 621.314.26

Васильєв О.Г., к.т.н., доцент, Олейніченко В.О., студент, гр.4371
Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, м. Миколаїв

АВТОМАТИЗОВАНИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД НАСОСА ВОДОПОСТАЧАННЯ ПИТНОЇ І ТЕХНІЧНОЇ ВОДИ

Система водопостачання являє собою комплекс споруджень, що здійснюють завдання водопостачання, тобто одержання води із природних джерел, її очищення, транспортування й подачу різним споживачам у заданій кількості й при необхідному тиску [4].

Насоси і насосні станції є основними елементами і, в той же час, основними споживачами електроенергії в системах водопостачання і водовідведення.

Насосні агрегати на основі АД є одними з наймасовіших споживачів електроенергії, споживаючи близько 25 % усієї вироблюваної електроенергії.

Актуальність економії електроенергії й технічний прогрес спричиняють інтерес до сучасних рішень автоматизації систем водопостачання.

В разі доволі частої зміни режимів водопостачання доводиться оперативно регулювати режими роботи насосних установок. Регулювання продуктивності може здійснюватися наступними способами:

- дроселювання з використанням заслінок або клапанів;
- використання вхідного направляючого апарату у відцентровий вентилятор для обмеження потоку;
- застосування різних муфт (електричних, гідравлічних) для регулювання моменту між валом двигуна та насосом;
- дискретне регулювання «Увімк/Вимк»;
- регулювання кута атаки лопатей крильчатки.

Недоліком традиційних способів регулювання продуктивності є відсутність прямого ефекту економії енергії. Є можливість зменшення енергоспоживання за допомогою цих способів, але жоден з них не ефективний в області збереження енергії настільки, наскільки ефективним є застосування частотно-регульованого електропривода.

Найефективнішим способом регулювання швидкості обертання робочого колеса насоса є використання регульованого електропривода. Цей метод, у порівнянні зі зміною гідравлічних параметрів трубопровода чи насоса, дає можливість розширити діапазон регулювання продуктивності насосного агрегата за суттєвого зменшення споживання його двигуном електричної енергії.

Застосовують два способи регулювання подачі відцентрових насосів – зміною характеристики системи і зміною частоти обертання робочого колеса [3].

Порівняння способів регулювання продуктивності насоса показано на рисунку 1.

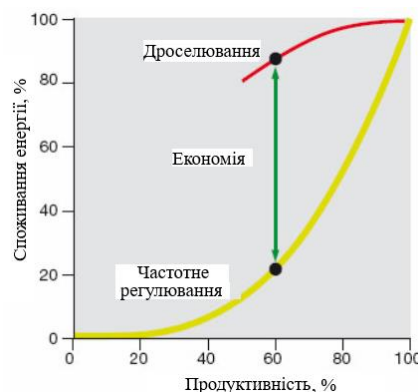


Рисунок 1 – Порвняльна характеристика між двома способами регулювання продуктивності насоса

Регулювання подачі води зміною частоти обертання робочого колеса дозволить одержати економію електроенергії, а також економію води, ресурсу електронасоса. Виключення прямих пусків двигуна дозволяє знизити пускові струми в 5-6 разів, уникнути гідравлічних і механічних ударів і надлишкового тиску в магістралі, збільшити термін служби двигуна, насосів і трубопроводів

Метою роботи є модернізація системи керування електропривода глибинного, занурюваного відцентрового насоса водопостачання.

Модернізація полягає в упровадженні в систему керування насосного агрегата частотного перетворювача.

Прогнозується, що автоматизація дозволить зменшити витрати на обслуговування та підвищить надійність роботи мережі водопостачання за рахунок зменшення стрибків тиску.

В даній роботі розглядається система керування електропривода насосного агрегата типу ЕЦВ.

Агрегат електронасосний свердловинний ЕЦВ 10-63-110, призначений для підйому води із свердловин. Агрегат може бути використаний для промислового і сільськогосподарського водопостачання, а також для зрошення і пониження рівня ґрунтових вод. Може бути побутовою насосною станцією. Спеціально сконструйований для подачі великих об'ємів глибинних вод на поверхню.

Технічні характеристики насосного агрегата ЕЦВ-10-63-110 наведені в таблиці 1 [1].

Таблиця 1 - Технічні характеристики насосного агрегата ЕЦВ-10-63-110

Параметр	Значення
Діаметр обсадної труби D	10" (260 мм)
Подача Q	63 м ³ /год
Напір H	110 м
Потужність P	33,0 кВт
Струм I	66 А
Частота обертання n	3000 об/хв
Напруга мережі U	380 В
Кількість ступенів N	5

Схема монтажу насоса в скважину наведена на рисунку 2.

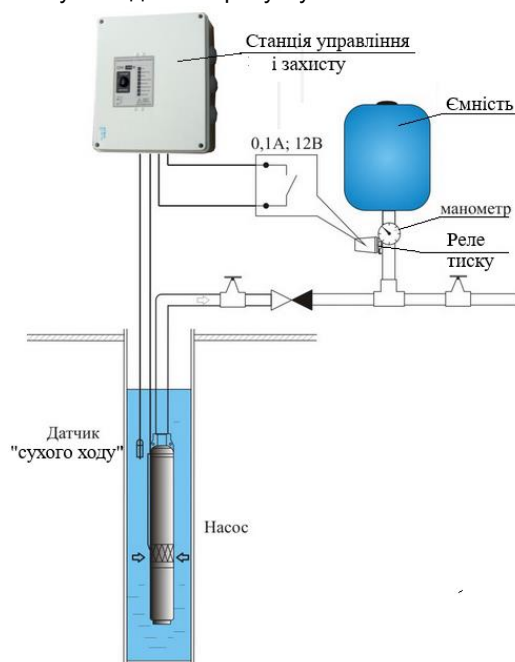


Рисунок 2 – Схема монтажу насоса ЕЦВ в скважину

Електродвигун є невід'ємною частиною насосного агрегата.

Технічні характеристики електродвигуна АІР200М2 наведені в таблиці 2.

Таблиця 2 - Технічні характеристики електродвигуна АІР200М2.

Параметр	Розмірність	Значення
Тип двигуна		тип ПЕДВ*
Потужність двигуна $P_{ном}$	кВт	37
Число полюсів p_n		2
Номінальна частота обертання ротора $n_{ном}$	об/хв	2950
Синхронна частота обертання ротора $n_{синхр}$	об/хв	3000
Номінальна частота мережі $f_{ном}$	Гц	50
Номінальна фазна напруга $U_{ном}$	В	220/380
Номінальний фазний струм $I_{ном}$	А	67,9
Номінальний крутний момент $M_{ном}$	Н·м	119,78
ККД	%	92
Коефіцієнт потужності $\cos \varphi$		0,89
$M_n / M_{ном}$	-	2
$M_{тах} / M_{ном}$	-	2,2
$I_n / I_{ном}$	-	7,5
Ковзання S_n	%	1,9
Критичне ковзання $S_{кр}$	%	12,5

* Двигун тип ПЕДВ - негерметичний водозаповнений двигун для свердловинних насосів

В результаті проведеного аналізу існуючих систем керування для керування даним двигуном обраний перетворювач частоти з частотним керуванням, **перетворювач частоти серії Delta CP2000 VFD-F**. Частотний спосіб керування дозволяє змінювати швидкість обертання валу двигуна у широких межах [5].

Перетворювач частоти (частотний перетворювач, або регулятор частоти обертання) являє собою електротехнічний пристрій, що перетворює трифазну напругу мережі в трифазну напругу змінної амплітуди і частоти. До входу частотного перетворювача підключається мережа живлення, до виходу підключається двигун насоса. Коли необхідне обертання двигуна на малих обертах, перетворювач подає на нього низьку напругу (і, відповідно, потужність). У міру зростання навантаження двигуна, інвертор підвищує напругу і частоту живлення двигуна до номінальних. Таким чином він здатний регулювати продуктивність насоса від нуля до його паспортного значення.

Як тільки тиск досягає заданого значення, перетворювач частоти підтримує поточну частоту обертання. Як правило, при цьому насос працює на частоті, дещо меншій, ніж його паспортна частота і споживає менше електроенергії. Якщо під час роботи витрати води збільшаться, то перетворювач частоти по сигналу датчика тиску відстежить тенденцію до падіння тиску і підвищить продуктивність насоса. І, навпаки, в нічний час частота обертання насоса автоматично знизиться.

Функціональна схема системи керування насосною станцією представлена на рисунку 3.

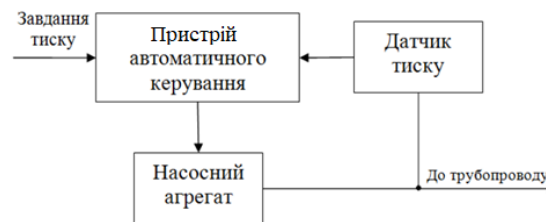


Рисунок 3 – Функціональна схема системи керування насосною станцією

При виконанні розробки математичної моделі електропривода припустимо, що частотний перетворювач здатен виконувати плавне регулювання частоти струму двигуна таким чином, що двигун працює на практично лінійній частині характеристики (момент опору від 0 до номінального) [2].

Вважаємо, що для насоса залежність моменту опору від частоти обертання має квадратичний вид

$$M_0(\omega) = K_{M0} \cdot \omega^2.$$

Параметр M_d , - жорсткість робочої частки механічної характеристики, розраховується по формулі

$$M_d = M_H / (\omega_0 - \omega_H),$$

де M_H – номінальний момент двигуна, розраховується як відношення номінальної потужності до номінальної швидкості, $M_H = P_H / \omega_H$;

ω_0 – синхронна швидкість;

ω_H – номінальна швидкість.

Параметр T_d – постійна часу двигуна, розраховується за даними таблиці 3.1.

Параметр J – приведений момент інерції. Вважаючи, що момент інерції насоса і інших приєднаних мас J_m урахується коефіцієнтом 0,75, отримуємо

$$J = J_0 + J_m,$$

де $J_m = 0,75 \cdot J_0$,

$$J = 0,15 + 0,75 \cdot 0,15 = 0,26 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Перетворюючи значення частоти обертання з об/хв. на с^{-1} , ($\omega = 2\pi n / 60$), отримуємо:

- номінальна частота обертання ротора

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot 3000}{60} = 314,16 \text{ с}^{-1}.$$

- синхронна частота обертання ротора

$$\omega_H = \frac{2 \cdot \pi \cdot 2950}{60} = 308,8 \text{ с}^{-1}.$$

При цьому:

- параметр M_d , Н·м·с,

$$M_d = 119,8(314,16 - 308,8) = 642,2 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}.$$

Постійна часу двигуна T_d , с,

$$T_d = \frac{1}{\omega_H \cdot S_{кр}}$$

де $S_{кр}$ – критичне ковзання (відомо з довідника, таблиця 2).

$$T_d = \frac{1}{308,8 \cdot 0,125} = 0,026 \text{ с.}$$

Таким чином отримали наступні дані лінеаризованої моделі двигуна:

- жорсткість робочої частки механічної характеристики $M_d = 642,2 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}$;
- постійна часу двигуна $T_d = 0,026 \text{ с}$;
- приведений момент інерції $J = 0,26 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$.

На рисунку 4 наведена структурна схема електропривода з двоконтурною системою підлеглого керування.

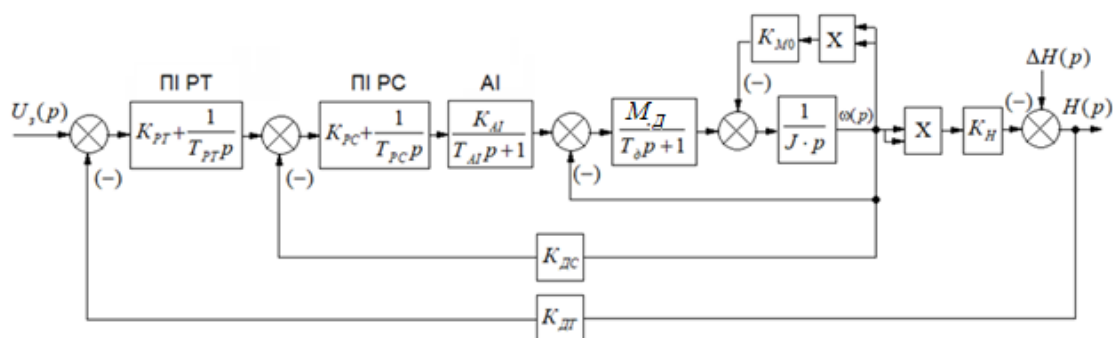


Рисунок 4 – Структурна схема електропривода з двоконтурною системою підлеглого керування

Отримані для елементів структурної схеми дані зводимо до таблиці 3.

Таблиця 3 - Вихідні дані для розрахунку перехідних процесів

Параметр	Одиниці виміру	Значення
Жорсткість робочої частки механічної характеристики	Н·м·с	$M_d = 642,2$
Постійна часу двигуна	с	$T_d = 0,026$
Приведений момент інерції	кг·м ²	$J = 0,26$
Постійна часу інвертора	с	$T_{дт} = 0,0033$
Постійна часу ПІ-регулятора тиску	с	$T_{пт} = 0,026$
Коефіцієнт передачі інвертора	–	$K_{дт} = 20$
Коефіцієнт підсилення ПІ-регулятора тиску	–	$K_{пт} = 10$
Постійна часу ПІ-регулятора струму	с	$T_{рс} = 0,00333$
Коефіцієнт підсилення ПІ-регулятора струму	–	$K_{рс} = 10$
Передатний коефіцієнт по тиску	В/м	$K_{дт} = 0,143$
Передатний коефіцієнт по струму	В·А / Н·м	$K_{дс} = 5,67$
Передатний коефіцієнт моменту опору	Н·м·с ²	$K_{мо} = 0,0001$

Відповідно до рисунку 4 та по даним, отриманим у результаті розрахунку параметрів ланок структурної схеми (таблиця 3), була складена розрахункова схема для дослідження динаміки системи керування електропривода насосного агрегату. Моделювання виконувалося у середовищі програми Simulink пакету MathLab версії 6.5.0.

На рисунку 5 приведений вид моделі для розрахованих раніше параметрів.

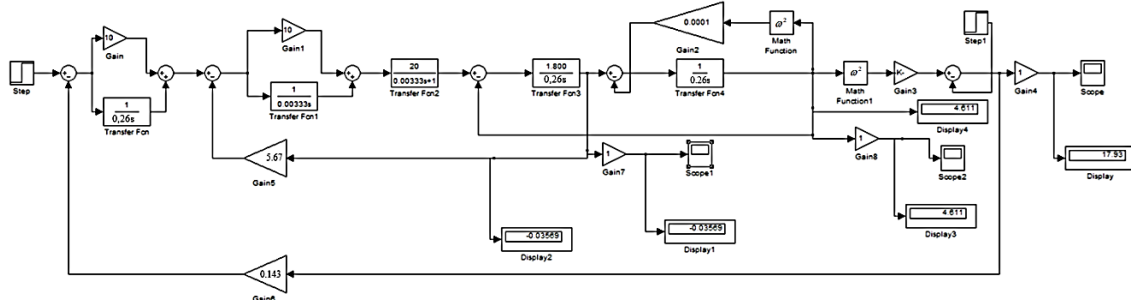


Рисунок 5 – Розрахункова структурна схема

Результати моделювання наведені на рисунку 6.

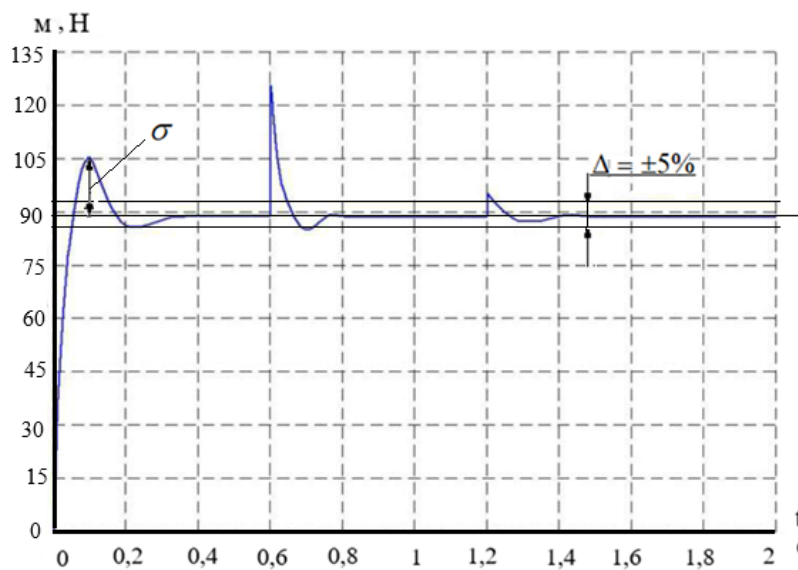


Рисунок 6 - Графік перехідного процесу по напору

Після пуску, характеристика має перехідний процес спочатку довжиною 0,2 с, амплітуда 105 м, перерегулювання $\sigma = 17\%$ і виходить на постійну величину напору 90 м.

Далі система піддається різкому зменшенню споживання води (0,6 с) - перерегулювання $\sigma = 38\%$, час перехідного процесу 0,15 с, після якого напір стабілізується на 90 м.

Повторне зменшення споживання води (1,2 с) породжує аналогічний перехідний процес довжиною 0,1 с після якого напір виходить знову на 90 м.

Висновки: В результаті проведених розрахунків системи керування електропривода глибинного сважинного насоса водопостачання у каналі керування напором при розрахункових параметрах налагодження системи керування отримані такі показники якості перехідного процесу, які задовольняють технічним вимогам до ЕП.

Список використаних джерел

1. Глибинний насос ЕЦВ 10-63-110. URL: [https://nep.ua/nasosy/glubinnyye?mfp=14-qmax-m3-god\[63\],15-hmax-m\[110\]](https://nep.ua/nasosy/glubinnyye?mfp=14-qmax-m3-god[63],15-hmax-m[110])
2. Голодний І.М. Регульований електропривод: Підручник / І.М. Голодний, Ю.М. Лавріненко, В.В. Козирський, Л.С. Червінський, Д.А. Абдураманов, А.В. Торопов, О.В. Санченко; За ред. І.М. Голодного. – К.: ТОВ "ЦП "Компринт", 2015. – 509 с
3. Грабко, В. В. Метод та засоби оптимізації роботи електроприводів насосної станції водопостачання: монографія / В. В. Грабко, М. М. Мошноріз. - Вінниця : ВНТУ, 2011. - 138 с.
4. Тугай, А.М. Водопостачання: Підручник / А. М. Тугай, В. О. Орлов. – Знання, 2009 – 735 с.
5. Частотне керування асинхронним приводом: Методичні вказівки для самостійної роботи з дисципліни „Основи електропривода” для студентів напряму підготовки 6.100101 – „Енергетика та електротехнічні системи в АПК” / Ловейкін В.С., Ромасевич Ю.О. – Ніжин.: 2011.
6. Частотное регулирование насосов. URL: <https://eleksun.com.ua/blog/article/navishcho-potriben-chastotnyy-kontrol-nasosiv>.

УДК 621.314.26

Писарєв О.С., студент, гр.4371, Васильєв О.Г., к.т.н., доцент

Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, м. Миколаїв

АВТОМАТИЗОВАНИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД ВОДЯНИХ НАСОСІВ КОТЕЛЬНОЇ УСТАНОВКИ

Автоматизація технологічних процесів на тепловій електростанції є вирішальним моментом у забезпеченні надійності та ефективності виробництва теплової та електричної енергії.

Найбільшою складовою ресурсоємності є енергоспоживання.

Другою складовою ресурсоємності є витрата води, природні запаси якої обмежені.

Тому важливим є зниження енергоємності технологічного процесу водопостачання.

Подача води насосною станцією (НС) повинна відповідати потребам споживача, які змінюються протягом доби. Тому її продуктивність потрібно регулювати.

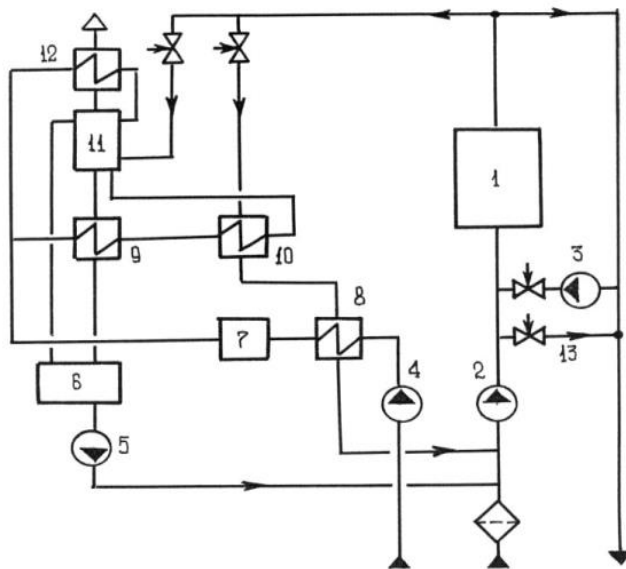
Сучасна тенденція розвитку електропривода полягає в заміні традиційно нерегульованого асинхронного електропривода насосів регульованим електроприводом, оснащеним асинхронним двигуном з короткозамкненим ротором (АДКЗ) з частотним регулюванням. Регулювання подачі насосів частотою обертання двигуна дозволяє зменшити втрати енергії на 20 – 30% проти регулювання кранами, засувками, шиберами.

Автоматизація СВ дозволить використовувати насосний агрегат в більшому технологічному об'ємі, зменшить загальне енергоспоживання, зменшить витрати на обслуговування та підвищить надійність роботи мережі водопостачання за рахунок зменшення стрибків тиску.

Метою роботи є модернізація системи керування насосної установки тепловодопостачання районної опалювальної котельні, що служить для теплопостачання великих житлових масивів. Котельні такого типу обладнають порівняно потужними водогрійними або паровими котлами.

Модернізація полягає у підвищенні показників безпеки системи тепловодопостачання шляхом упровадження в систему керування електропривода мережного насоса водогрійної котельні частотного перетворювача.

Принципова тепла схема котельні зі сталевими водогрійними котлами, які працюють на закриту систему теплопостачання, наведена на рисунку 1 [4].



1 – котел; 2 – **МЕРЕЖЕВИЙ НАСОС**; 3 – рециркуляційний насос; 4 – поживний насос; 5 - насос, що підживлює; 6 – бак води, що підживлює; 7 - апарат хімічної очистки води; 8 – підігрівач сирогої води; 9, 10 – підігрівачі хімічно очищеної води; 11 – деаератор; 12 – охолоджувач випаровування; 13 – лінія перепускання

Рисунок 1 – Теплова схема котельні з водогрійними котлами при закритій системі теплопостачання

Вода із зворотної лінії теплових мереж з невеликим тиском (близько 30 м вод.ст.) надходить до **мережевого насоса 2**. Туди надходить також вода від насоса для компенсації втрат води в теплових мережах.

Насос мережний електричний (насос МЕ), як правило, призначений для роботи з рідинами, нагрів яких не перевищує 181 градус по Цельсію. Ці насоси виконані за технологією, що передбачає горизонтальне розташування робочого валу і випускаються з горизонтальним розніманням кожуха.

В даній роботі розглядається районна **опалювальна котельня**, де встановлені мережні насоси (агрегати) моделі СЭ 1250-70-11-3-УХЛ4.

Технічні характеристики насосного агрегата наведено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Технічні характеристики насосного агрегата [5]

Параметр	Значення
Марка агрегату	СЭ 1250-70-11
Подача, м ³ /год	1250
Напір, м	70
Частота обертання, об/хв	1500
Потужність електродвигуна, кВт	315
к.к.д., %	83

Насосний агрегат складається з насоса, приводного електродвигуна, сполучної муфти.

У якості приводного двигуна насоса СЕ 1250-70-11 використаний асинхронний електродвигун типу АИР355М4.

Технічні характеристики електродвигуна наведені в таблиці 2.

Таблиця 2 – Технічні характеристики електродвигуна АИР355М4

Характеристика	Значення
Тип двигуна	АИР355М4
Струм при 380В, А	558
Потужність, кВт	315
Частота обертання, об/хв.	1490
ККД, %	95,2
Коефіцієнт потужності $\cos \varphi$	0,9
$M_{\max}/M_{\text{ном}}$	2,2
$M_p/M_{\text{ном}}$	2,1
Момент інерції, кг·м ²	8,2
$I_p/I_{\text{ном}}$	6,9
Коефіцієнт ковзання S_H , %	0,7
Критичне ковзання $S_{\text{кр}}$, %	5,8
Маса, кг	1900

Режими роботи механізмів відцентрового типу визначаються трьома величинами: подачею Q , напором H і частотою обертання n . Ці величини визначають також момент опору й потужність на валу механізму.

Експлуатаційні властивості механізмів відцентрового типу визначаються Q - H характеристикою й залежністю ККД від подачі при $n = \text{const}$ [3].

Момент опору на валу двигуна M_0 , Н·м, [2]

$$M_0 = \frac{\rho g Q H}{\omega \eta_M}, \quad (1)$$

де ρ – щільність рідини, кг/м³ (для води = 1000 кг/м³);

g – прискорення вільного падіння, $g = 9,81$ м/с²;

Q – продуктивність турбомеханізму, м³/с;

H – напір, м;

η_M – коефіцієнт корисної дії турбомеханізму;

ω – кутова швидкість робочого органу насоса, рад/с.

Зважаючи на те, що будь-яке регулювання приводить до зміни характеристики або насосного агрегата (НА), або самої мережі водопостачання, завдання досягнення рівності подачі із графіка водопостачання сумарній подачі НС при певній значенні напору на її виході ускладнюються тим, що зі зміною значення подачі змінюється й значення напору. Таким чином, для одержання значень подачі НА станції, сумарного значення подачі станції (Q) і напору на її виході (H), при яких забезпечується спільна робота НС і мережі водопостачання й покриваються потреби міста у воді, необхідно вирішити рівняння

$$H = (\omega / \omega_H)^2 \cdot H_0 - R \cdot Q, \quad (2)$$

де H – напір;

ω – кутова швидкість робочого органу насоса;

H_0 – напір, що розвиває насос при нульовій подачі;

R – внутрішній опір мережі водопостачання;

Q – подача НА.

Напір H на виході кожного НА відповідає певному значенню напруги завдання ($U_{\text{зад}}$).

При подальшому використанні моделі вважаємо, що залежність моменту опору від обертів має вид

$$M_o(\omega) = M_H (\omega / \omega_H)^2.$$

Згідно з законом пропорційності насоса маємо

$$W_{PC}(p) = K_{DC} + 1/T_{PC} \cdot p.$$

Тому що зміна подачі залежить від внутрішнього опору мережі водопостачання, обираємо двоконтурну систему керування з підлеглим регулюванням струму.

Функціональна схема такої системи керування зображена на рисунку 2.

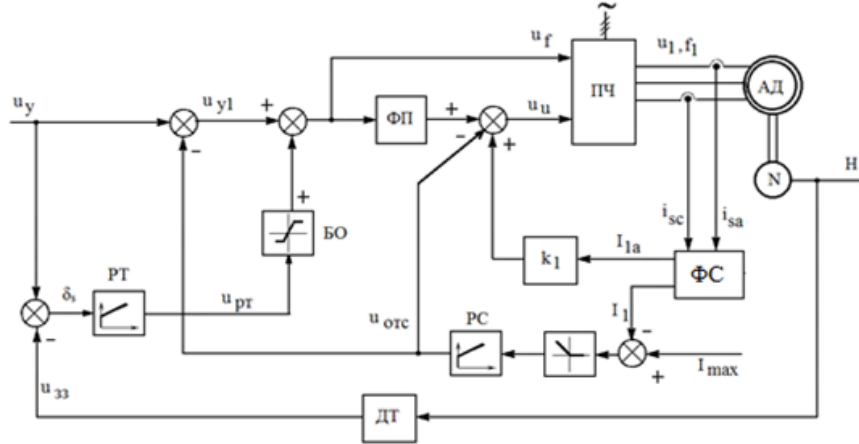


Рисунок 2 – Функціональна схема двоконтурної системи керування з підлеглим регулюванням струму

На схемі позначені: РТ – регулятор тиску; РС – регулятор струму; ПЧ – частотний перетворювач; АД – асинхронний двигун; N – насос; ФП – функціональний перетворювач напруги; ФС – функціональний перетворювач струму; ДТ – датчик тиску; u_y – напруга завдання; u, f – керовані напруга та частота живлення АД; H – напір.

Більшість сучасних частотних перетворювачів підтримують роботу у режимі частотно-струмового керування асинхронним електродвигуном. Цей спосіб дозволяє змінювати швидкість обертання валу двигуна у широких межах.

В результаті проведеного аналізу існуючих систем керування для керування двигуном обраний перетворювач частоти з частотним керуванням, **перетворювач типу Danfoss VLT AQUA**.

При виконанні розробки математичної моделі електропривода припустимо, що частотний перетворювач здатен виконувати плавне регулювання частоти струму двигуна таким чином, що двигун працює на практично лінійній частині характеристики (момент опору від 0 до номінального).

На рисунку 3 наведена структурна схема насосного агрегата (лінеаризована модель двигуна і модель насоса). Вважаємо, що система керування забезпечує роботу двигуна на відрізок характеристики від 0 до номінального моменту (лінійний відрізок).

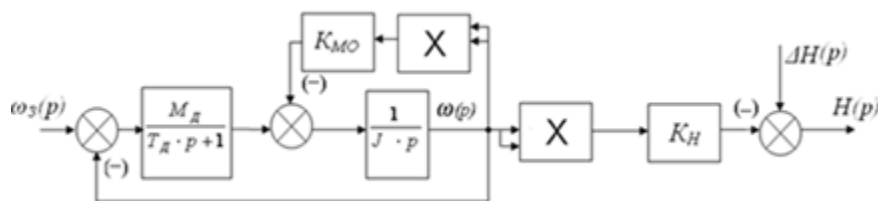


Рисунок 3 – Схема лінеаризованої моделі насосного агрегата

До складу системи керування входять автономний інвертор, регулятори тиску і струму з передатними функціями $W_{AI}(p)$, $W_{PT}(p)$ і $W_{PC}(p)$ відповідно.

Інвертор вважаємо аперіодичною ланкою з передатною функцією [1]

$$W_{AI}(p) = K_{AI} / T_{AI} p + 1,$$

де K_{AI} – коефіцієнт підсилення інвертора;

T_{AI} – постійна часу інвертора.

Приймаємо від регуляторів тиску і струму як пропорційно-інтегральні з коефіцієнтами передачі K_{PT} і K_{PC} та постійними часу T_{PT} і T_{PC} відповідно:

$$W_{PT}(p) = K_{PT} + 1/T_{PT} \cdot p,$$

$$W_{PC}(p) = K_{PC} + 1/T_{PC} \cdot p.$$

У якості ланок, що відповідають датчикам струму та тиску, застосуємо пропорційні ланки з коефіцієнтами $K_{ДТ}$ і $K_{ДС}$.

В документації приводів функціональні та структурні схеми відсутні. Тому складаємо структурну схему (для подальшого моделювання), виходячи з припущень, що система керування із частотним перетворювачем у складі замкненої системи керування відповідає по структурі двоконтурній системі підпорядкованого керування із внутрішнім контуром струму та зовнішнім контуром тиску. На рисунку 4 наведена структурна схема такого привода.

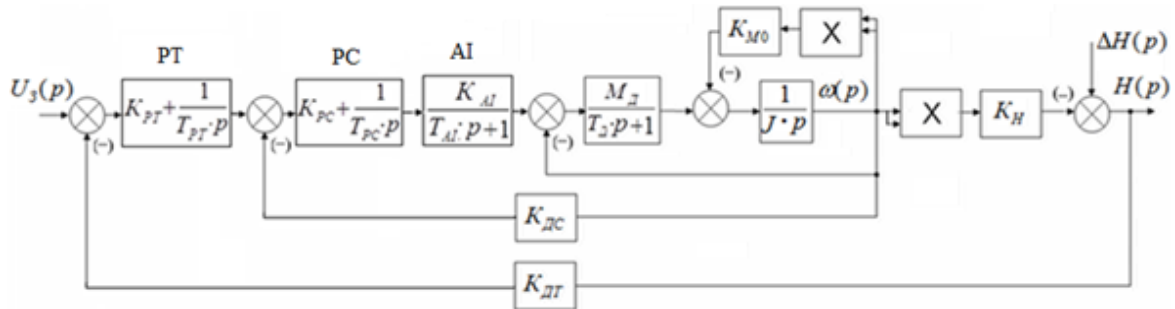


Рисунок 4 – Структурна схема електропривода

Розраховані для елементів структурної схеми дані зводимо до таблиці 3.

Таблиця 3 – Вихідні дані для розрахунку перехідних процесів

Параметр	Одиниці виміру	Значення
Жорсткість робочої частки механічної характеристики	Н·м·с	$M_D = 2146$
Постійна часу двигуна	с	$T_D = 0,11$
Приведений момент інерції	кг·м ²	$J = 14,35$
Постійна часу інвертора	с	$T_{AI} = 0,00333$
Постійна часу ПІ-регулятора тиску	с	$T_{PT} = 0,11$
Коефіцієнт передачі інвертора	–	$K_{AI} = 20$
Коефіцієнт підсилення ПІ-регулятора тиску	–	$K_{PT} = 10$
Постійна часу ПІ-регулятора струму	с	$T_{PC} = 0,00333$
Коефіцієнт підсилення ПІ-регулятора струму	–	$K_{PC} = 10$
Передатний коефіцієнт по тиску	В/м	$K_{ДТ} = 0,143$
Передатний коефіцієнт по струму	В·А / Н·м	$K_{ДС} = 2,78$
Передатний коефіцієнт моменту опору	Н·м·с ²	$K_{МО} = 0,0001$

Відповідно до рисунку 4 та по даним, отриманим у результаті розрахунку параметрів ланок структурної схеми (таблиця 3), була складена розрахункова схема для дослідження динаміки системи керування електропривода насосного агрегата. Моделювання виконувалося у середовищі програми Simulink пакету MathLab версії 6.5.0.

На рисунку 5 приведений вид моделі для розрахованих раніше параметрів.

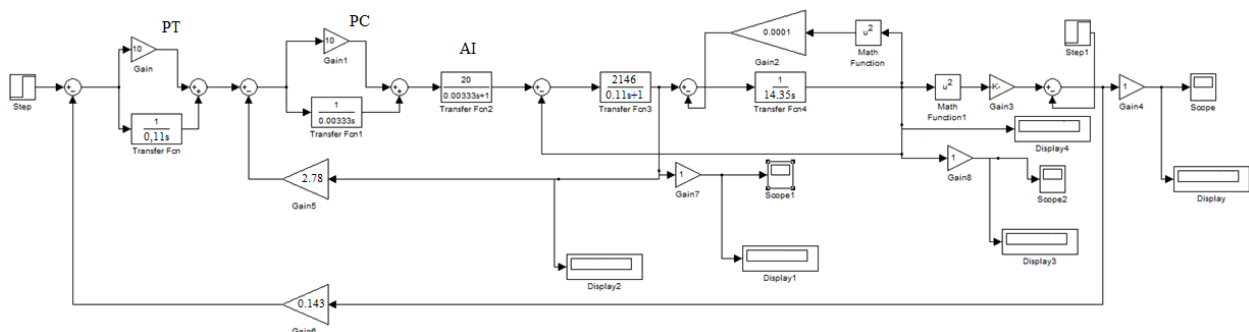


Рисунок 5 – Розрахункова динамічна схема

Результати моделювання наведені на рисунку 6.

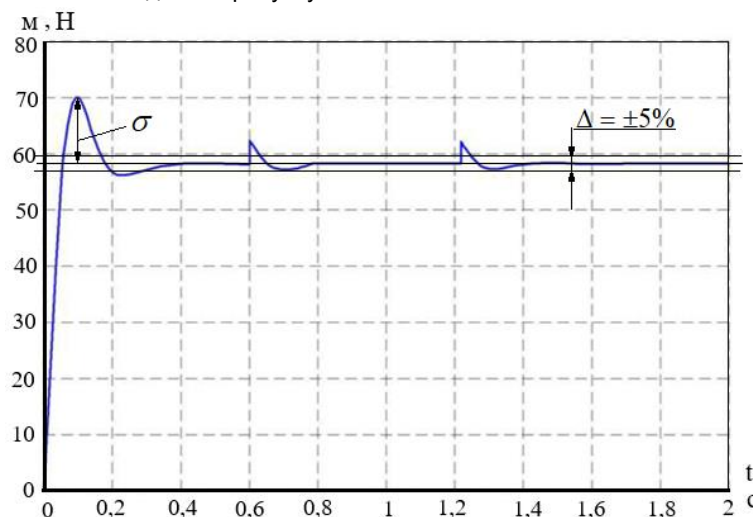


Рисунок 6 – Графік перехідного процесу по напору

На рисунку 6 зображений перехідний процес зміни напору.

Після пуску, характеристика має перехідний процес спочатку довжиною 0,25 с, амплітуда 70 м, перерегулювання $\sigma = 20\%$ і виходить на постійну величину напору 58 м.

Далі система піддається різкому зменшенню споживання води (0,6 с) - перерегулювання $\sigma = 10,3\%$, час перехідного процесу 0,2 с, після якого напір стабілізується на 29 м.

Повторне зменшення споживання води (1,22 с) породжує аналогічний перехідний процес довжиною 0,2 с після якого напір виходить знову на 58 м.

Висновки: В результаті проведених розрахунків системи керування електропривода насоса водопостачання у каналі керування напором при розрахункових параметрах налагодження системи керування отримані такі показники якості перехідного процесу, які задовольняють технічним вимогам до ЕП.

Список використаних джерел

1. Голодний І.М. Регульований електропривод: Підручник / І.М. Голодний, Ю.М. Лавріненко, В.В. Козирський, Л.С. Червінський, Д.А. Абдураманов, А.В. Торопов, О.В. Санченко; За ред. І.М. Голодного. – К.: ТОВ "ЦП "Компринт", 2015. – 509 с. Грабко, В. В. Метод та засоби оптимізації роботи електроприводів насосної станції водопостачання: монографія / В. В. Грабко, М. М. Мошноріз. – Вінниця : ВНТУ, 2011. – 138 с.
2. Грабко, В. В. Метод та засоби оптимізації роботи електроприводів насосної станції водопостачання: монографія / В. В. Грабко, М. М. Мошноріз. – Вінниця : ВНТУ, 2011. – 138 с.
3. Коренькова Т. В. Режим роботи насосних та вентиляторних установок із автоматизованим електроприводом: навч. посібник / Т. В. Коренькова, О. О. Сердюк, В. Г. Ковальчук. – Кременчук: Видавництво ПП Щербатих О. В., 2013. – 200 с.
4. Малявіна О. М. Теплопостачання: конспект лекцій для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної і заочної форм навчання зі спеціальності 192 – Будівництво та цивільна інженерія, освітньо-професійна програма «Теплогазопостачання і вентиляція» / О. М. Малявіна, В. А. Міланко; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2023. – 147 с.
5. Насос мережевий типу СЕ. Каталог насосів_ООО «Сумський Машинобудівний Завод» URL: <https://nasos.biz/upload/iblock/d3d/d3dbad20571b2892bf35905e5668b3a3.pdf>.

ЗМІСТ

ПЛЕНАРНА СЕКЦІЯ	3
<i>Верещаго Є.М., Джангіров М.В., Єременко А.П.</i> Моделювання датчиків струму у джерелах живлення з цифровим керуванням для плазмотронів	3
<i>Демідов І.А., Черно О.О.</i> Алгоритм побудови передаточної функції для вібраційних конвеєрів із врахуванням хвильових ефектів	5
<i>Льовкін В.С., Білюк І.С., Савченко О.В.</i> Електромеханічний перетворювач хвильової електростанції.....	7
<i>Пальчиков О.О.</i> Динаміка синхронного двигуна в складі електромеханічної системи робота циліндричної системи координат	9
СЕКЦІЯ 1. ІМПУЛЬСНІ ПРОЦЕСИ І ТЕХНОЛОГІЇ	14
<i>Малюшевська А.П., Гунько В.І., Перекупка І.А., Танасова О.Д.</i> Адаптація занурювальної частини електророзрядного пристрою для обробки вертикальних нафтових свердловин до умов роботи в горизонтальних свердловинах.....	14
<i>Козирєв С.С.</i> Забезпечення максимальної ефективності екзотермічного перетворення енергії при високовольтному електрохімічному вибуху	16
<i>Гунько В.І., Танасова О.Д., Фещук Т.А.</i> Створення свердловинних високовольтних імпульсних конденсаторів, призначених для експлуатації при високих температурах навколишнього середовища	19
СЕКЦІЯ 2. ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНІ КОМПЛЕКСИ, ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ І АПАРАТИ	22
<i>Стрункін Г.М.</i> Моделювання роботи електромеханічної системи автономної ВЕУ з АДМ на базі АГФР зі збудженням від інвертора напруги при рекупруючому навантаженні	22
<i>Волянський Ю.С., Яценко В.С., Волянська Я.Б., Волянський С.М.</i> Оцінка впливу кавітації на ефективність експлуатації пропульсивних комплексів об'єктів морської робототехніки	24
<i>Чекунов В.К., Костюченко В.І.</i> Сучасні аспекти розвитку електрорушійних систем судна	26
<i>Онищенко О.В., Смалієвський В.Ю., Красюк О.М., Волянський С.М.</i> Перспективи використання багаторівневих інверторів у системах автоматизованого електропривода	32
<i>Гетманцева В.С., Черніков М.О., Волянська Я.Б.</i> Порівняльний аналіз методів моделювання електромеханічних систем у середовищах MATLAB/ SIMULINK та SCILAB/XCOS	36
<i>Козлов О.І., Лебідь О.О., Волянський С.М.</i> Дослідження впливу коливань напруги живлення на динаміку електроприводу.....	39
<i>Новогрецький С.М., Барішник Ю.М.</i> Вплив демпферної обмотки на статичну стійкість паралельної роботи синхронних генераторів.....	43
<i>Новогрецький С.М., Меліхов Д.С.</i> Розрахунок потоку розсіювання в обмотковому вікні керованого підмагнічування реактора.....	47
<i>Пальчиков О.О.</i> Моделювання роботи електропривода повороту колони робота з регуляторами швидкості і положення на базі синхронного двигуна	50
СЕКЦІЯ 3. МОРСЬКЕ ПРИЛАДОБУДУВАННЯ. АВТОМАТИКА, ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ І ПРИСТРОЇ	54
<i>Грудініна Г.С.</i> Штучний інтелект в судових автоматизованих системах	54
<i>Прищепов Є.О., Грешинов А.Ю.</i> Пристрій для прийому та відтворення поточкових аудіо даних	56
<i>Клочков О.П., Овсянников В.М.</i> Комунікаційна система «Судно – небезпека для судноплавства»	58
<i>Угольніков Г.Г., Герасін О.С.</i> Кінематична модель робота-маніпулятора у рухливій підвісній системі	60
<i>Стогнієнко Є.В.</i> Порівняння нечітких систем керування джерелом живлення для плазмового різання	62
<i>Костенко Д.В., Трибулькевич С.Л., Трибулькевич В.В.</i> Розподілена система збирання даних та телекерування	65
<i>Трешнюк А.І., Дьяконов О.С.</i> Інтерактивна карта України як інструмент оперативного інформування населення в умовах війни та змін погодних умов	69
<i>Прищепов Є.О., Грешинов А.Ю.</i> Моделювання рефлектометричного вимірювального перетворювача рівня на базі інтегрального перетворювача «ЧАС-КОД»	71
<i>Верещаго Є.М., Єременко А.П., Джангіров М.В.</i> Синтез ПІД-регуляторів імпульсних джерел живлення плазмотронів засобами системи MATLAB/SIMULINK	73
<i>Горбов В.Ю.</i> Підхід до генерації оптимальної траєкторії для руху квадрокоптера	76
<i>Топалов А.М.</i> Структури та засоби безпеки безпроводних мереж Wi-Fi в задачах автоматизації.....	79
СЕКЦІЯ 4. ПЕРЕТВОРЮВАЛЬНА ТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ	82
<i>Рябенський В.М., Худякова І.М.</i> Генератор синусоїдальних коливань з одним часо-задаючим конденсатором	82
<i>Буряк В.С.</i> Моделювання високоякісного джерела напруги на базі мікросхеми TL431.....	84
<i>Махнов А.О., Вінниченко І.Л.</i> Моделювання резонансного перетворювача для системи електроживлення суден на електричній тязі	89
СЕКЦІЯ 5. АВТОМАТИЗОВАНИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД	92
<i>Білюк І.С., Савченко О.В., Рачинський А.В.</i> Спосіб модернізації електропривода бурової установки ..	92
<i>Білюк І.С., Савченко О.В., Льовкін В.С.</i> Удосконалення системи керування деревообробного верстата	95

<i>Дьяконов О.С., Іхсанов Ш.М., Воскобоєнко В. І., Федорук Д. Л.</i> Особливості підготовки керуючих програм для фрезерних верстатів при гравіруванні пояснювальних табличок для суднової електротехнічної продукції	98
<i>Войтасик А.М., Бессараб Н.М.</i> Особливості розробки електропривода похилого стрічкового конвеєра з довжиною транспортування вантажу 12 м	102
<i>Войтасик А.М., Буравченко В.Є.</i> Особливості розробки електропривода суднової лебідки вантажопідйомністю 3 т	105
<i>Войтасик А.М., Гоцуленко Я.В.</i> Особливості розробки електропривода мостового крана вантажопідйомністю 5 т	107
<i>Войтасик А.М., Клименко В.С.</i> Особливості розробки електропривода консольно-поворотного крана вантажопідйомністю 2,5 т	110
<i>Рачинський А.В., Білюк І.С., Савченко О.В.</i> Особливості моделювання процесів перетворення енергії у хвильових електростанціях	112
<i>Васильєв О.Г., Олейніченко В.О.</i> Автоматизований електропривод насоса водопостачання питної і технічної води	114
<i>Писарєв О.С., Васильєв О.Г.</i> Автоматизований електропривод водяних насосів котельної установки	119

Наукове видання

СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ АВТОМАТИКИ ТА ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ СПАЕ-2025

ВСЕУКРАЇНСЬКА НАУКОВО-ТЕХНІЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ

29-30 квітня 2025 року

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
м. Миколаїв, проспект Центральний, 3

МАТЕРІАЛИ КОНФЕРЕНЦІЇ

(українською та англійською мовами)

Відповідальний за випуск:

О.О. Пальчиков

Комп'ютерна верстка:

О.О. Пальчиков

Видавець Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова

проспект Героїв України, 9, м. Миколаїв, 54007

E-mail: publishing@nuos.edu.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 2506 від 25.05.2006 р.