

## РОЗРОБЛЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ АВТОНОМНИМ ТРАНСПОРТНИМ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИМ КОМПЛЕКСОМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ТА ПРАВОВІ ОСОБЛИВОСТІ ЇЇ РЕАЛІЗАЦІЇ

Маслов І. З.<sup>1</sup>, Кулагін Д. О.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Дунайський інститут Національного університету  
«Одеська морська академія»

<sup>2</sup>Національний університет «Запорізька політехніка»

***Анотація.** Об'єктом дослідження є проблема синтезу високоефективної та робастної системи керування для тягового асинхронного двигуна автономного транспортного комплексу електропостачання, а також аналіз правового поля для його впровадження. Метою роботи є розроблення регулятора струму, здатного забезпечити задану якість перехідних процесів і стійкість до значних варіацій параметрів об'єкта, типових для транспортних енергетичних установок. Для досягнення цієї мети застосовано метод поліноміального синтезу регуляторів, що ґрунтується на використанні розподілу коефіцієнтів характеристичного полінома за Батервортом. Такий підхід дозволив цілеспрямовано сформувати бажані динамічні характеристики без перерегулювання та з високою швидкодією. Під час дослідження було синтезовано та проаналізовано регулятор, який демонструє значно вищу робастність, як порівняти з традиційними регуляторами, зберігаючи стабільність характеристик у процес коливань активного опору двигуна, спричинених температурними змінами. Це доводить його практичну придатність для використання в складних умовах експлуатації. Крім того, проаналізовано правові аспекти інтеграції таких автономних комплексів у транспортну (рейкову, колісну, водну) та енергетичну інфраструктуру України. Наголошується на необхідності гармонізації національного законодавства з європейськими директивами, зокрема в частині впровадження розумних мереж і розподіленої генерації.*

***Ключові слова:** енергетична установка, автоматичне керування, автономний інвертор напруги, електричні апарати, електричні машини, математичне моделювання, електричні системи та мережі.*

### Вступ

Енергетична ефективність транспортних систем електропостачання є ключовим фактором, що визначає економічність та екологічність їхньої експлуатації. Сучасні транспортні енергетичні системи, зокрема тягові дизель-генераторні установки, є складними інтегрованими комплексами. До їхнього складу належать тепловий двигун, синхронний генератор, перетворювач частоти і тяговий асинхронний двигун, який живить рушійну установку.

Під час практичної експлуатації було визначено, що ці системи як цілісні комплекси значно складніші для забезпечення максимального енергозбереження за окремими їхні компоненти. Ця обставина зумовлює необхідність дослідження транспортних енергетичних систем для отримання максимально можливого потенціалу енергозбереження. Це досягається не тільки через регулювання кожного елемента окремо, але й через реалізацію взаємовпливу складових системи на загальний рівень споживання енергії.

Вирішення завдання підвищення енергетичної ефективності можливе лише в комплексі – способом розгляду оптимального режиму роботи всієї системи загалом. Ігнорування цього принципу призводить до ситуації, коли економічна робота окремих вузлів не забезпечує ефективної роботи всієї системи електропостачання, що, як наслідок, спричиняє підвищене споживання палива. Зазначений підхід необхідно реалізувати з урахуванням синергетичних властивостей усєї енергетичної системи.

Під час вибору режимів керування основними елементами саме вони мають вибиратися з урахуванням реалізації енергетичного потенціалу всієї системи, ефективність якої має максимізуватися як для сукупної та неподільної структури.

### Аналіз публікацій

Розвиткові наукових засад технічної експлуатації окремих елементів транспортних енергетичних систем присвячено значну кількість наукових досліджень [1–4]. У низці

окремих праць [5–8] висвітлюється вплив окремих елементів енергетичних систем та їхніх груп, зокрема об'єднаних комбінацій типу перетворювач-двигун, дизель-генератор, на загальну енергетичну ефективність приводної системи.

Згідно з досвідом технічної експлуатації [9–12], ці системи є складнішими за можливостями енергозбереження, як порівняти з об'єднаними групами елементів. Ця обставина доводить необхідність комплексного дослідження транспортних енергетичних систем для отримання потенціалу енергозбереження [13, 14].

Ігнорування принципу оптимізації всієї системи призводить до ситуації, коли ефективне керування окремими вузлами не забезпечує ефективної роботи всієї установки, що спричиняє підвищене споживання палива [15, 16].

Так само робота дизеля в режимі економічної характеристики часто викликає нераціональне функціонування інших елементів, які не можуть реалізувати свій максимальний потенціал енергозбереження [17, 18]. Використання комплексного підходу до керування енергетичною системою, що забезпечує максимально можливий енергоефективний режим роботи всієї установки, дасть змогу повноцінно реалізувати потенціал енергозбереження [19, 20].

Створення системи керування, яка є малочутливою до варіації параметрів об'єкта керування (що є визначальним для транспортних енергетичних систем), можливе на основі регуляторів, синтезованих методом поліномів [21, 22]. Їх використання в системах електроприводів апробовано та обґрунтовано з огляду на отримані перехідні характеристики [23, 24]. Питання зменшення залежності від зміни параметрів об'єкта керування методами синтезу регуляторів є актуальним і розглядається багатьма авторами [25, 26].

Однак, питання синтезу елементів системи автоматичного керування тяговим асинхронним двигуном транспортної дизель-генераторної енергетичної установки не досліджено комплексно. Важливим є питання аналізу якості синтезованих регуляторів системи керування в процесі варіації параметрів, що особливо притаманно транспортним енергоустановкам. Отже, тема статті є актуальною.

#### Мета та постановка завдання

Метою роботи є синтез системи керування автономним транспортним комплексом

електропостачання й аналіз правових особливостей його реалізації.

Для досягнення поставленої мети необхідно проаналізувати транспортну дизель-генераторну енергетичну установку, розробити методику синтезу елементів системи автоматичного керування та перевірити адекватність отриманих результатів і відповідність їх реальним перехідним процесам.

Синтез передавальної функції нового регулятора буде здійснюватися за критерієм забезпечення заданих характеристик перехідного процесу (обмеження часу перехідного процесу та показника коливності) за умов зміни параметрів об'єкта регулювання під впливом температури навколишнього середовища.

#### Синтез системи керування автономним транспортним комплексом електропостачання

Енергетична система, структурну схему якої подано на рис. 1, є комбінованим джерелом енергії для живлення приводної установки та споживачів електроенергії загальнотранспортного призначення.

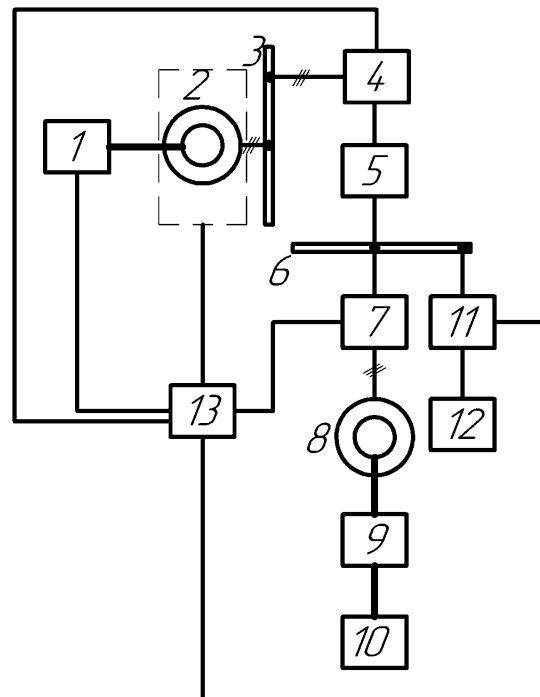


Рис. 1. Структурна схема транспортної енергетичної системи (для одного контуру).

Первинний тепловий двигун (переважно дизель) позначений як елемент 1, який є джерелом механічної енергії для всієї системи. Ця енергія передається до синхронного генератора (2); пунктирною лінією в цьому випадку може бути позначена взаємодія сис-

теми синхронний генератор-збудник. Згенерована електрична енергія надходить на загальну шину змінного струму (3), звідки далі подається на випрямляч (4). Випрямлена напруга проходить крізь блок фільтрів постійного струму (5), забезпечуючи необхідну якість сигналу перед надходженням на загальну шину постійного струму (6). Далі енергія спрямовується до автономного інвертора напруги (7), який живить асинхронну машину (8), що здійснює функцію тягового двигуна. Механічна енергія від асинхронної машини передається крізь редуктор (9) на рушій (10), який забезпечує рух транспортного засобу. Окремо від загальної шини живлення передбачено наявність перетворювача власних потреб (11), що забезпечує енергією споживачів (12). Керування та координацію роботи всіх зазначених елементів здійснює система автоматичного керування (13).

Найбільш швидкодієним контуром регулювання системи автоматичного керування тяговим асинхронним двигуном транспортної дизель-генераторної енергетичної установки є контур регулювання струму, який визначає динамічні властивості всієї системи. Саме тому необхідно здійснити синтез регулятора струму для нього. Замкнуту систему регулювання струму асинхронного двигуна можна зобразити у вигляді послідовно з'єднаних об'єкта регулювання та відповідного регулятора, охоплених від'ємним зворотним зв'язком. Для синтезу регулятора струму передавальну функцію об'єкта регулювання позначимо так:

$$W_{об}(p) = \frac{P(p)}{Q(p)} = \frac{k_0 \cdot P_{k+}(p) \cdot P_{n+}(p) \cdot P_-(p)}{Q_{k+}(p) \cdot Q_{n+}(p) \cdot Q_-(p) \cdot p^s} \quad (1)$$

Поліноми  $P(p)$  та  $Q(p)$  містять праві та нейтральні нулі й полюси об'єкта керування, крім тих, що розташовані за  $p = 0$ ; поліноми  $P_{n+}(p)$  та  $Q_{n+}(p)$  містять лише ті ліві нулі й полюси об'єкта, які не підлягають компенсації; поліноми  $P_{k+}(p)$  та  $Q_{k+}(p)$  мають як свої нулі лише ліві нулі й полюси об'єкта керування, які компенсуються регулятором; коефіцієнт  $s$  може набувати значень 0, 1, 2, що дорівнює кількості полюсів об'єкта за  $p = 0$ ; коефіцієнт  $k_0$  – це коефіцієнт підсилення контуру об'єкта керування.

Оскільки компенсація поліномів призводить до компенсації певних полюсів або ну-

лів об'єкта керування та з огляду на те, що не всі нулі й полюси варто компенсувати (через те, що компенсація  $P_-(p)$  та  $Q_-(p)$  спричиняє порушення стійкості системи), передавальна функція регулятора струму, яка забезпечує задовільні похибки та властивості системи, має такий вид:

$$W_p(p) = \frac{Q_{k+}(p) \cdot R(p)}{P_{k+}(p) \cdot V(p) \cdot p^{r-s} \cdot k_0}, \quad (2)$$

де  $r$  – задовільний порядок астатизму системи, а  $R(p)$  та  $V(p)$  – відповідні поліноми, які формуються в процесі синтезу регулятора струму.

Для пошуку коефіцієнтів регулятора величини, наведені як рівняння (1) та (2), необхідно додати до поліноміального виразу синтезу (який часто називають характеристичним рівнянням чи рівнянням Діофанта):

$$R(p) \cdot P_-(p) \cdot P_{n+}(p) + V(p) \cdot Q_-(p) \cdot Q_{n+}(p) \cdot p^r = H(p), \quad (3)$$

де  $H(p)$  є характеристичним поліномом замкнутого контуру. Значення цього полінома визначаються відповідно до вимог забезпечення необхідного виду перехідного процесу та часу його загасання, які дорівнюють одному з основних відомих розподілів: біноміальному Ньютона, Батерворта, Бесселя, Чебишова, інтегральному показнику якості. Загальноприйняті вирази розподілів коефіцієнтів характеристичного полінома широко застосовуються залежно від бажаних показників перехідного процесу.

Розв'язання рівняння (3) дає вирази невідомих поліномів  $R(p)$  і  $V(p)$ , які є необхідними для обчислення передавальної функції регулятора (2).

Розв'язання рівняння (3) пропонується здійснити на основі методу невизначених коефіцієнтів через відносну простоту реалізації такого розв'язку в динамічних задачах. Найменше розв'язання поліноміальних рівнянь дорівнює найменшим степеням поліномів  $R(p)$  і  $V(p)$  та дозволяє визначити мінімальний степінь передавальної функції регулятора струму (2), що сприяє отриманню високої швидкодії замкнутої системи регулювання струму завдяки вибору мінімального степеня характеристичного полінома замкнутої системи регулювання струму  $H(p)$ .

Нехай  $|X|$  – степінь довільного полінома  $X(p)$ . Тоді отримаємо вираз, що відображає мінімальний степінь поліномів виразу (3):

$$\begin{cases} |R| = |Q_-| + |Q_{n+}| + r - 1, \\ |V| = |Q| - |P_{k+}| - 1, \\ |H| = |R| + |V| + 1. \end{cases} \quad (4)$$

Відповідно до встановленого вигляду об'єкта керування, заданого рівнянням (1), задамо поліноми чисельника визначеної передавальної функції об'єкта регулювання:

$$\begin{aligned} P_{n+}(p) &= 1, \\ P_{k+}(p) &= 1, \\ P_-(p) &= 1. \end{aligned} \quad (5)$$

Також необхідно визначити поліноміальні вирази знаменника визначеної передавальної функції об'єкта регулювання:

$$\begin{aligned} Q_{n+}(p) &= 1, \\ Q_{k+}(p) &= (Tp + 1), \\ Q_-(p) &= (T_2p + 1) \cdot (T_3p + 1), \\ s &= 0. \end{aligned} \quad (6)$$

Наступним етапом буде визначення степені відповідно до поліномів чисельника й знаменника передавальної функції об'єкта регулювання та її складових, заданих рівняннями (5) і (6):

$$\begin{aligned} |P| &= 0, |P_{k+}| = 0, |P_{n+}| = 0, |P_-| = 0, \\ |Q| &= 3, |Q_{k+}| = 1, |Q_{n+}| = 0, |Q_-| = 2, s = 0. \end{aligned} \quad (7)$$

Покращення точності виконання керування впливів та зменшення впливу збурювальних моментів у системі автоматичного керування досягається завдяки астатичним регуляторам. Їхнє використання дозволяє значно поліпшити характеристику регулювання, зокрема за умови, коли астатичний регулятор застосовується зі статичним об'єктом керування. Таким чином, під час розрахування регулятора струму враховується відповідний показник астатизму  $r = 1$ .

Визначивши необхідний порядок астатизму  $r=1$ , розрахуємо значення виразу для мінімального степеня характеристичного полінома замкнутої системи, використовуючи співвідношення (4) та попередні розрахунки (7):

$$\begin{aligned} |R| &= |Q_-| + |Q_{n+}| + r - 1 = 2, \\ |V| &= |Q| - |P_{k+}| - 1 = 2, \\ |H| &= |R| + |V| + 1 = 5. \end{aligned} \quad (8)$$

Позначимо як  $\hat{R}(p)$ ,  $\hat{V}(p)$ ,  $\hat{H}(p)$  відповідні поліноми зі степенем, пониженим на одиницю, що дає змогу отримати поліноми з меншим порядком і спростити завдяки цьому процес реалізації та налаштування системи. Завдяки такому підходу середньгеометричний корінь характеристичного полінома  $H(p)$  стає однозначно підпорядкованим характеристикам системи:

$$\omega_0 = \frac{1}{T_m}, \quad (9)$$

де  $T_m$  – це еквівалентна мала постійна часу замкнутої системи регулювання струму.

З огляду на (8) маємо вираз для бажаного характеристичного полінома:

$$\begin{aligned} |\hat{R}| &= |R| - 1 = 1, \\ |\hat{V}| &= |V| - 1 = 1, \\ |\hat{H}| &= |H| - 1 = 4. \end{aligned} \quad (10)$$

Нехай поліноми характеристичного рівняння мають такий завершений вигляд:

$$\begin{aligned} \hat{R}(p) &= r_i p + r_{i-1} p^{i-1} + \dots + r_1 p + r_0, \\ \hat{V}(p) &= v_j p + v_{j-1} p^{j-1} + \dots + v_1 p + v_0, \end{aligned} \quad (11)$$

де  $i$  та  $j$  – це максимальний степінь поліномів чисельника та знаменника передавальної функції об'єкта керування.

За співвідношеннями (5)–(8) перепишемо поліноміальне рівняння синтезу (3) в розгорнутій формі, підставляючи вирази для поліномів об'єкта та регулятора, а також бажаний характеристичний поліном:

$$\begin{aligned} (r_1 p + r_0) + (v_1 p + v_0)(T_2 p + 1)(T_3 p + 1) p = \\ = \alpha_4 T_0^4 p^4 + \alpha_3 T_0^3 p^3 + \alpha_2 T_0^2 p^2 + \alpha_1 T_0 p + \alpha_0, \end{aligned} \quad (12)$$

де  $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5$  – це коефіцієнти многочлена  $H(p)$ , які є визначеними значеннями та задаються відповідно до бажаних динамічних характеристик замкнутої системи (час перехідного процесу та показник коливальності). Ці коефіцієнти вибираються відповідно до одного з еталонних розподілів (біноміальний Ньютона, Батерворта або Бес-

селя), що забезпечує необхідну якість перехідного процесу.

Для запобігання перерегулюванню в контурі струму під час процесу розрахунків регулятора струму використовуємо схему розподілу коефіцієнтів характеристичного полінома за методом Батерворта. Цей метод відомий тим, що забезпечує максимально рівномірну амплітудно-частотну характеристику в смузі пропускання, що в часовій області гарантує монотонний або близький до монотонного перехідний процес із мінімальним або відсутнім перерегулюванням.

На основі розгорнутого поліноміального рівняння синтезу, отриманого раніше, використовуючи метод невизначених коефіцієнтів, визначимо коефіцієнти поліномів  $\hat{R}(p)$ ,  $\hat{V}(p)$  способом прирівнювання коефіцієнтів за однакових степенях  $p$  у лівій та правій частинах рівняння. Отримані аналітичні вирази для розрахунку передавальної функції регулятора струму системи автоматичного керування транспортної дизель-генераторної енергетичної установки мають такий вид:

$$v_1 = \frac{\alpha_4}{T_2 T_3 \omega_0^4} \quad (13)$$

$$v_0^{(1)} = \frac{\frac{\alpha_2}{\omega_0^2} - v_1}{T_2 + T_3} \quad (14)$$

$$v_0^{(2)} = \frac{\frac{\alpha_3}{\omega_0^3} - v_1(T_2 + T_3)}{T_2 T_3} \quad (15)$$

$$r_1 = \frac{\alpha_1}{\omega_0} - v_0 \quad (16)$$

$$r_0 = \frac{\alpha_0}{\omega_0} \quad (17)$$

За виразами (14) та (15) знаходимо значення середньгеометричного кореня за умови рівності правих частин формул, що є необхідною умовою для синтезу регулятора. Критично важливо, щоб хоча б одне рішення цієї формули було додатним дійсним числом, оскільки це визначає можливість фізичної реалізації регулятора в реальній системі.

З урахуванням знайдених коефіцієнтів, задамо передавальну функцію отриманого регулятора струму в стандартному вигляді:

$$W_{pc}(p) = \frac{(Tp+1)(r_1p+r_0)}{(v_1p+v_0)pk} \quad (18)$$

Взявши за основу інформацію про транспортну дизель-генераторну енергетичну установку Caterpillar 3516 [27], отримуємо перехідні характеристики (зобразимо реакцію на одиничний ступінчастий сигнал) синтезованого регулятора (18) та базового регулятора струму енергетичної установки, наведені на рис. 2. Згідно з ним базовий регулятор досягає необхідного рівня заданого сигналу швидше, оскільки має перерегулювання, коефіцієнт якого становить орієнтовно п'ять відсотків.

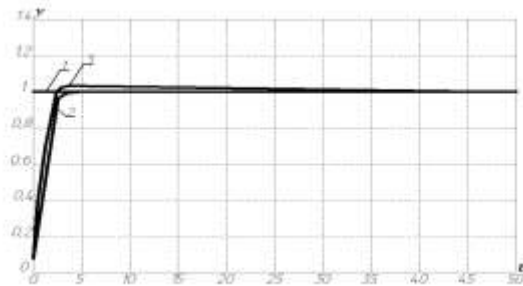


Рис. 2. Характеристики синтезованого регулятора (2) та базового регулятора струму (3) за реакції на одиничний сигнал завдання (1)

Натомість, у синтезованому регуляторі перерегулювання відсутнє, що позитивно впливає на його стабільність і точність у досягненні бажаного значення, оскільки під час його синтезу не закладалися коефіцієнти, які спричиняють перерегулювання (наприклад, коефіцієнти Вишнеградського). Відсутність перерегулювання є ключовою перевагою, яка внесе значні зміни у стійкість перехідних процесів до зміни параметрів контурів регулювання, що є критично важливим для транспортних енергоустановок, які працюють у змінних умовах.

Навіть в процесі виходу сигналу завдання на рівень 0,92 від встановленого (наведено на рис. 3) базовий регулятор досягає заданого сигналу в 0,71 раза швидше.

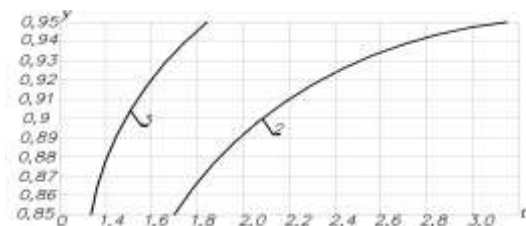


Рис. 3. Характеристики синтезованого регулятора (2) та базового регулятора струму (3) за реакції на одиничний сигнал завдання на рівні 0,92 від досягнення сигналу завдання

Проте час регулювання синтезованого регулятора знаходиться в межах 10–13 мілісекунд, що є цілком достатнім показником швидкодії для транспортної енергетичної системи. Ця швидкість реакції попри те, що вона дещо нижча за швидкість реакції базового регулятора з перерегулюванням, забезпечує необхідну динамічну якість в разі збереження високої стійкості до варіацій параметрів об'єкта.

Активний опір статорного кола асинхронного двигуна варіюється в процесі прогрівання, оскільки температура елементів транспортної енергетичної системи може коливатися в широкому діапазоні зміни від  $-45^{\circ}\text{C}$  до  $+65^{\circ}\text{C}$ . Це призводить до зміни опору в 1,47 рази співвідносно номінального значення, що чітко відображає істотний вплив температурних коливань на характеристики системи.

Системи автоматичного керування, які синтезуються традиційними підходами, відрізняються від систем, синтезованих методом поліномів, тим, що вони не можуть забезпечити необхідну якість керування в разі зміни активного опору статорного кола асинхронного генератора. Для перевірки зменшено та збільшено опір статорного кола асинхронного двигуна в 1,47 рази співвідносно номіналу.

Це дасть змогу визначити, як саме зміни в опорі впливають на перехідну характеристику синтезованого регулятора струму, яка наведена на рис. 4. Така перевірка дозволить проаналізувати, наскільки стійким та ефективним є регулятор за суттєвих варіацій опору.

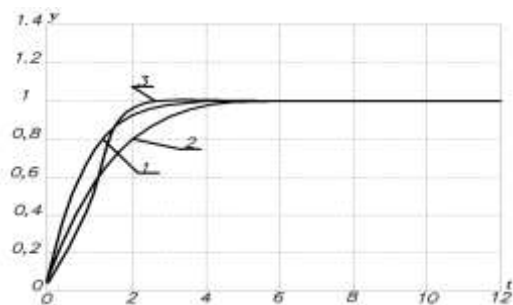


Рис. 4. Характеристики синтезованого регулятора струму, коли значення опору статорного ланцюга номінальне (1), коли значення опору статорного ланцюга в 1,47 рази зменшено (3) та коли збільшено в 1,47 рази щодо номіналу (2)

З метою порівняння також буде здійснена перевірка роботи базового регулятора струму за зміни активного опору статорного кола

асинхронного двигуна в 1,47 рази від його номінального значення. Це дасть змогу оцінити ефективність базового регулятора за тих самих умов, що й для синтезованого регулятора, та здійснити порівняльний аналіз результатів, які наведені на рис. 5. Зіставлення цих результатів є критично важливим для об'єктивного аналізу робастності та практичної придатності обох підходів до регулювання в умовах експлуатації транспортних енергетичних систем зі значними температурними коливаннями.

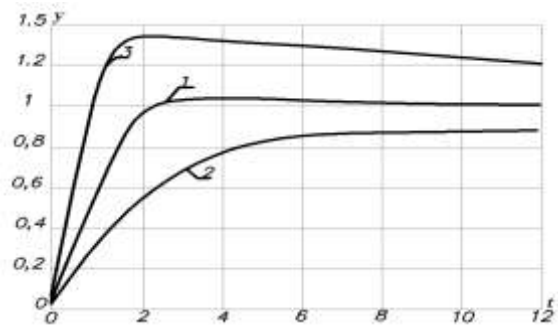


Рис. 5. Характеристики базового регулятора струму, коли значення опору статорного ланцюга номінальне (1), коли значення опору статорного ланцюга в 1,47 рази зменшено (3) та коли збільшено в 1,47 рази від номіналу (2)

Згідно з рис. 5, можна дійти висновку, що базовий регулятор, синтезований традиційним методом підпорядкованого регулювання, за аналогічної зміни активного опору статорного кола асинхронного двигуна в 1,47 рази від номінального значення демонструє нестабільні перехідні характеристики. У разі збільшення опору статорного кола спостерігається значне зменшення швидкодії регулятора, що проявляється в збільшенні часу регулювання.

Натомість у разі зменшення опору з'являється істотне перерегулювання, яке досягає рівня до 46 %. Це однозначно доводить нестабільність роботи регуляторів, синтезованих за методом підпорядкованого регулювання за варіації параметрів об'єкта регулювання.

На противагу цьому перехідні характеристики, наведені на рис. 4, повною мірою доводять стабільність роботи синтезованого регулятора струму за зміни активного опору статорного кола асинхронного двигуна в 1,47 рази. Це свідчить про його високу робастність та здатність підтримувати стабільність і задану якість перехідних процесів навіть за умов значних варіацій параметрів об'єкта.

### Правові особливості реалізації системи керування автономним транспортним комплексом електропостачання

Реалізація автономної транспортної системи електропостачання в умовах національного правового поля є багатоаспектним завданням, що вимагає ретельного аналізу норм законодавства у сферах енергетики та транспорту з акцентом на специфіку транспортної енергетики, що охоплює судна, колісний та рейковий транспорт.

Ключовим аспектом для рейкового транспорту є забезпечення технічної інтероперабельності та безпеки руху. Автономна система має відповідати галузевим стандартам щодо напруги, частоти та надійності електропостачання, оскільки будь-які відхилення можуть прямо вплинути на безпеку руху поїздів. Об'єкти автономної транспортної системи електропостачання, що живлять залізничну мережу, можуть бути визнані критичною інфраструктурою, що накладає додаткові вимоги щодо захисту, кібербезпеки систем управління та забезпечення безперебійності роботи.

Для колісного транспорту та електромобілів, зокрема для автономних мереж зарядних станцій, регулювання вимагає відповідності національним стандартам щодо роз'ємів, потужності та безпеки експлуатації зарядних станцій. Постачання електроенергії для зарядки є комерційною діяльністю, що вимагає дотримання правил роздрібного ринку електричної енергії щодо ціноутворення, комерційного обліку та взаємовідносин зі споживачами.

У контексті водного транспорту, зокрема за реалізації концепції берегового електропостачання (Shore Power) у портах, правове поле має враховувати як національні, так і міжнародні вимоги. Для морських суден застосовуються міжнародні конвенції, зокрема Міжнародна конвенція щодо запобігання забрудненню із суден, що регулюють екологічні стандарти.

Автономна транспортна система електропостачання в порту має забезпечити дотримання стандартів, які дозволяють суднам вимикати бортові дизель-генератори, сприяючи зменшенню забруднення. Суднові системи та портова інфраструктура підлягають нагляду Регістру судноплавства України або міжнародних класифікаційних товариств, які визначають вимоги до безпеки електричних установок на судах і берегових об'єктах.

Гармонізація правового поля щодо реалізації автономної транспортної системи елек-

тропостачання із законодавством Європейського Союзу є обов'язковим елементом євроінтеграційного курсу України та впливає з її зобов'язань як члена Енергетичного співтовариства та в межах Угоди про асоціацію з Європейським Союзом.

Ключовим напрямом гармонізації є впровадження положень Третього енергетичного пакета ЄС та подальших регуляторних актів, відомих як пакет «Чиста енергія для всіх європейців» (Clean Energy for all Europeans). Ці документи вимагають створення умов для інтеграції розподіленої генерації і функціонування розумних мереж (Smart Grids). У контексті автономної транспортної системи електропостачання це означає необхідність законодавчої підтримки для просунутих рішень з управління енергією, гнучкості споживання та накопичення енергії.

### Висновки

У межах роботи було досягнуто поставленої мети, яка полягала в синтезі системи керування автономним транспортним комплексом електропостачання та аналізі правових особливостей його реалізації. Було розроблено та синтезовано регулятор струму для найбільш швидкодіючого контуру керування тяговим асинхронним двигуном із застосуванням методу поліномів. Для забезпечення необхідної якості перехідного процесу без перерегулювання були вибрані коефіцієнти характеристичного полінома за методом Батерворта.

Під час аналізу перехідних характеристик було визначено, що синтезований регулятор позбавлений перерегулювання, на відміну від базового, який має коефіцієнт перерегулювання, що становить орієнтовно п'ять відсотків. Час регулювання синтезованого регулятора знаходиться в межах 10–13 мілісекунд, що підтверджує його достатню швидкодію для транспортної енергетичної системи.

Ключовою перевагою розробленого підходу є висока робастність синтезованого регулятора до варіацій параметрів об'єкта. Це критично важливо для транспортних енергоустановок, оскільки робота в широкому температурному діапазоні від  $-45^{\circ}\text{C}$  до  $+65^{\circ}\text{C}$  спричиняє зміну активного опору статорного кола асинхронного двигуна до 1,47 рази від номіналу.

За такої зміни опору синтезований регулятор стабільно працює із заданою якістю перехідних процесів. На противагу цьому базовий регулятор, синтезований за тради-

ційним методом підпорядкованого регулювання, демонструє нестабільні характеристики: за збільшення опору значно зменшується швидкодія, а за зменшення опору виникає істотне перерегулювання, яке досягає рівня до 46 %, що однозначно доводить його нездатність підтримувати якість керування за умов варіації параметрів.

Реалізація автономної транспортної системи електропостачання є багатоаспектним завданням в умовах національного правового поля, що вимагає ретельного аналізу норм законодавства у сферах енергетики та транспорту, тобто забезпечення технічної інтероперабельності та безпеки руху для рейкового транспорту, відповідність національним стандартам для колісного транспорту та зарядних станцій, а також дотримання вимог міжнародних конвенцій і Регістру судноплавства України для водного транспорту. Необхідною умовою для практичної реалізації є гармонізація правового поля України із законодавством Європейського Союзу, яке впливає із зобов'язань у межах євроінтеграційного курсу та містить впровадження положень пакета «Чиста енергія для всіх європейців».

Це також вимагає законодавчої підтримки для інтеграції розподіленої генерації, функціонування розумних мереж і просунутих рішень з управління енергією.

### Література

1. Improving the Energy Efficiency of a Ship's Power Plant by Using an Autonomous Hybrid System with a PMSG / D. Tarnapowicz *et al.* *Energies*. 2023. Vol. 16. No. 7. P. 3158.
2. Polakis M., Zachariadis P., Kat J. O. The Energy Efficiency Design Index (EEDI). In *Sustainable Shipping*. New York, NY, USA: Springer, 2019. P. 93–135.
3. Cheng H., Chen H., Wang Q. An Integrated Drive Power Converter Topology for Plug-in Hybrid Electric Vehicle with G2V, V2G and V2H Functions. In *Proceedings of the 2019 22nd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*. Harbin, China, 11–14 August 2019. P. 1–6.
4. Power Generation Control Method of Parallel Resonant PMSG System for Series Hybrid Vehicle / S. Jindo *et al.* In *Proceedings of the 2022 International Power Electronics Conference (IPEC-Himeji 2022-ECCE Asia)*. Himeji, Japan, 15–19 May 2022. P. 1878–1884.
5. Multiple PMSG fed Non-Inverting Buck-Boost Converter for HEVs / A. K. *et al.* Chauhan In *Proceedings of the 2016 IEEE 6th International Conference on Power Systems (ICPS)*. New Delhi, India, 2016. P. 1–6.
6. A New Control Method for Microturbine-generation based Series Hybrid Power System / J. Wei *et al.* Wei In *Proceedings of the 2019 22nd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*. Harbin, China, 2019. P. 1–5.
7. Nayak S. K., Vinod H. Performance Study of Common DC Link Connected Wind and PV Hybrid System. In *Proceedings of the 2016 IEEE 7th Power India International Conference (PIICON)*. Bikaner, India, 2016. P. 1–5.
8. Design and Testing of PMSM for Aerospace EMA Applications / P. *et al.* Giangrande In *Proceedings of the IECON 2018—44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. Washington, DC, USA, 2018. P. 2038–2043.
9. Energy, Exergy, Environmental and Economic Analysis (4e) of a Solar Thermal System for Process Heating in Jamshoro, Pakistan / J. Ahmed *et al.* *Energies*. 2022. Vol. 15. No. 22. P. 8617.
10. Abdelaziz E. A., Saidur R., Mekhilef S. A review on energy saving strategies in industrial sector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2011. Vol. 15. P. 150–168.
11. A review of trends and drivers of greenhouse gas emissions by sector from 1990 to 2018 / W. F. Lamb *et al.* *Environmental Research Letters*. 2021. Vol. 16. P. 073005.
12. Optimized Diesel-Battery Hybrid Electric Propulsion System for Fast Patrol Boats with Global Warming Potential Reduction / H. Maydison, Zhang *et al.* *Journal of Marine Science and Engineering*. 2025. Vol. 13. No. 6. P. 1071.
13. Fast Patrol Boat Hull Design Concepts on Hydrodynamic Performances and Survivability Evaluation / A. S. Pratama *Journal of Applied Engineering Science*. 2023. Vol. 21. P. 501–531.
14. State-of-the-art technologies, measures, and potential for reducing GHG emissions from shipping – A review / E. A. Bouman *et al.* *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2017. Vol. 52. P. 408–421.
15. Kulahin D. Rolling electrical complex on the basis of the criterion of minimizing the area under the curve of motion. *Науковий Вісник Національного гірничого університету*. 2016. № 2. P. 60–67.
16. Research and Analysis of Permanent Magnet Transmission System Controls on Diesel Railway Vehicles / L. Kang *et al.* *Electronics*. 2021. Vol. 10. P. 173.
17. Kulagin D., Maslov I. Mathematical Model of Electromagnetic Transients of a Frequency-Controlled Propeller's Induction Motor. In *2024 IEEE 5th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. Kharkiv, Ukraine, 2024. P. 1–5.
18. An Improved Energy Management Strategy of Diesel-Electric Hybrid Propulsion System Based on FNN-DP Strategy / W. Li *et al.* *Electronics*. 2023. Vol. 12. No. 3. P. 486. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics12030486>

19. Concept and Design of a Shunting Locomotive Equipped with a Hybridized Fuel Cell Hydrogen Powertrain / M. et al. Konrad In *Proceedings of the 2021 Sixteenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*. Monte-Carlo, Monaco, 5–7 May 2021. P. 1–5.
20. Polater N., Tricoli P. Technical Review of Traction Drive Systems for Light Railways. *Energies*. 2022. Vol. 15. P. 3187.
21. Polynomial Synthesis Approach to Design and Control an LCL-Filter-Based PWM Rectifier with Extended Functions Validated by SIL Simulations / R. I. et al. Viera Diaz *Energies*. 2023. Vol. 16. No. 21. P. 7382.
22. Modelling of an Electric Vehicle Charging Station with PWM Rectifier to mitigate the Power Quality Issues / V. Vaideeswaran et al. In *Proceedings of the Transportation Electrification Conference (ITEC-India)*. New Delhi, India, 2021. P. 1–6.
23. Tawfeeq O. T., Ibrahim A. Y., Alabbawi A. A. M. Study of a Five-Level PWM Rectifier Fed DC Motor Drive. In *Proceedings of the 7th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ICEEE)*. Antalya, Turkey, 2020. P. 126–129.
24. Mathematical model for analysis of dynamical states of a drive system containing rolling mill and roller table including the selected parameters of a rolling process A. Rusek et al. In *2015 16th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*. Kouty nad Desnou, Czech Republic, 2015. P. 256–261.
25. Multiobjective Parametric Synthesis of Robust Control by Rolling Mills Main Electric Drives / B. Kuznetsov et al. In *2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP)*. Kremenchuk, Ukraine, 2020. P. 1–4.
26. Anti-Impact Strategy of PMSM-Based Tension Control System for Flexible Rope Applications / Z. Pan et al. In *2020 XI International Conference on Electrical Power Drive Systems (ICEPDS)*. 2020. P. 1–6.
27. Industrial Diesel Engines 3516. Cat. [Електронний ресурс]. URL: [https://www.cat.com/en\\_US/products/new/power-systems/industrial/industrial-diesel-engines/18397893.html](https://www.cat.com/en_US/products/new/power-systems/industrial/industrial-diesel-engines/18397893.html) (дата звернення: 29.11.2025).
4. Jindo, S., Kondo, K., Kondo, M., Yokouchi, T. (2022). Power Generation Control Method of Parallel Resonant PMSG System for Series Hybrid Vehicle. In *Proceedings of the 2022 International Power Electronics Conference (IPEC-Himeji 2022-ECCE Asia)*. Himeji, Japan, 15–19 May 2022. P. 1878–1884.
5. Chauhan, A. K., Vakacharla, V. R., Verma, A. K., Singh, S. K. (2016). Multiple PMSG fed Non-Inverting Buck-Boost Converter for HEVs. In *Proceedings of the 2016 IEEE 6th International Conference on Power Systems (ICPS)*. New Delhi, India, 2016. P. 1–6.
6. Wei, J., Wang, Y., Wen, X., Li, H., Zhang, Y., Li, K. (2019). A New Control Method for Micro-turbine-generation based Series Hybrid Power System. In *Proceedings of the 2019 22nd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*. Harbin, China, 2019. P. 1–5.
7. Nayak, S. K., Vinod, H. (2016). Performance Study of Common DC Link Connected Wind and PV Hybrid System. In *Proceedings of the 2016 IEEE 7th Power India International Conference (PIICON)*. Bikaner, India, 2016. P. 1–5.
8. Giangrande, P., Madonna, V., Sala, G., Kladas, A., Gerada, C., Galea, M. (2018). Design and Testing of PMSM for Aerospace EMA Applications. In *Proceedings of the IECON 2018 – 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. Washington, DC, USA, 2018. P. 2038–2043.
9. Ahmed, J., Kumar, L., Abbasi, A. F., El Haj Assad, M. (2022). Energy, Exergy, Environmental and Economic Analysis (4e) of a Solar Thermal System for Process Heating in Jamshoro, Pakistan. *Energies*. Vol. 15, no. 22. P. 8617.
10. Abdelaziz, E. A., Saidur, R., Mekhilef, S. (2011). A review on energy saving strategies in industrial sector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 15. P. 150–168.
11. Lamb, W. F., Wiedmann, T., Pongratz, J., Andrew, R., Crippa, M., Olivier, J. G., Wiedenhofer, D., Mattioli, G., Al Khouradajie, A., House, J., et al. (2021). A review of trends and drivers of greenhouse gas emissions by sector from 1990 to 2018. *Environmental Research Letters*. Vol. 16. P. 073005.
12. Maydison, Zhang H., Han, N., Oh, D., Jang, J. (2025). Optimized Diesel – Battery Hybrid Electric Propulsion System for Fast Patrol Boats with Global Warming Potential Reduction. *Journal of Marine Science and Engineering*. Vol. 13, no. 6. P. 1071.
13. Pratama, A. S., Prabowo, A. R., Tuswan, T., Adiputra, R., Muhayat, N., Cao, B., Hadi, S., Yaningsih, I. (2023). Fast Patrol Boat Hull Design Concepts on Hydrodynamic Performances and

### References

1. Tarnapowicz, D., German-Galkin, S., Nerc, A., Jaskiewicz, M. (2023). Improving the Energy Efficiency of a Ship's Power Plant by Using an Autonomous Hybrid System with a PMSG. *Energies*. Vol. 16, no. 7. P. 3158.
2. Polakis, M., Zachariadis, P., Kat, J. O. (2019). The Energy Efficiency Design Index (EEDI). In *Sustainable Shipping*. New York, NY, USA: Springer, 2019. P. 93–135.
3. Cheng, H., Chen, H., Wang, Q. (2019). An Integrated Drive Power Converter Topology for

- Survivability Evaluation. *Journal of Applied Engineering Science*. Vol. 21. P. 501–531.
14. Bouman, E. A., Lindstad, E., Rialland, A. I., Strømman, A. H. (2017). State-of-the-art technologies, measures, and potential for reducing GHG emissions from shipping – A review. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. Vol. 52. P. 408–421.
  15. Kulahin, D. (2016). Rolling electrical complex on the basis of the criterion of minimizing the area under the curve of motion. *Науковий Вісник національного гірничого університету*. № 2. P. 60–67.
  16. Kang, L., Jiang, D., Xia, C., Xu, Y., Sun, K. (2021). Research and Analysis of Permanent Magnet Transmission System Controls on Diesel Railway Vehicles. *Electronics*. Vol. 10. P. 173.
  17. Kulagin, D., Maslov, I. (2024). Mathematical Model of Electromagnetic Transients of a Frequency-Controlled Propeller's Induction Motor. In *2024 IEEE 5th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. Kharkiv, Ukraine, P. 1–5.
  18. Li, W., Wang, C., Pei, H., Xu, C., Lin, G., Deng, J., Jiang, D., Huang, Y. (2023). An Improved Energy Management Strategy of Diesel-Electric Hybrid Propulsion System Based on FNN-DP Strategy. *Electronics*. Vol. 12, no. 3. P. 486. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics12030486>.
  19. Konrad, M., Jäger, V., Pagenkopf, J., Böhm, M. (2021). Concept and Design of a Shunting Locomotive Equipped with a Hybridized Fuel Cell Hydrogen Powertrain. In *Proceedings of the 2021 Sixteenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*. Monte-Carlo, Monaco, 5–7 May 2021. P. 1–5.
  20. Polater, N., Tricoli, P. (2022). Technical Review of Traction Drive Systems for Light Railways. *Energies*, vol. 15. p. 3187.
  21. Viera Díaz, R. I., Nuñez, C., Visairo Cruz, N., Segundo Ramírez, J. (2023). A Polynomial Synthesis Approach to Design and Control an LCL-Filter-Based PWM Rectifier with Extended Functions Validated by SIL Simulations. *Energies*. 2023, vol. 16, no. 21. P. 7382.
  22. Vaideeswaran, V., Veerakumar, S., Sharmela, C., Bharathiraja, M., Chandrasekaran, P. (2021). Modelling of an Electric Vehicle Charging Station with PWM Rectifier to mitigate the Power Quality Issues. In *Proceedings of the Transportation Electrification Conference (ITEC-India)*. New Delhi, India, P. 1–6.
  23. Tawfeeq, O. T., Ibrahim, A. Y., Alabbawi, A. A. M. (2020). Study of a Five-Level PWM Rectifier Fed DC Motor Drive. In *Proceedings of the 7th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ICEEE)*. Antalya, Turkey, P. 126–129.
  24. Rusek, A., Shchur, I., Lis, M., Klatow, K., Gastołek, A., Sosnowski, J. (2015). Mathematical model for analysis of dynamical states of a drive system containing rolling mill and roller table including the selected parameters of a rolling process. In *2015 16th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*. Kouty nad Desnou, Czech Republic, P. 256–261.
  25. Kuznetsov, B., Bovdii, I., Nikitina, T., Kolomiets, V., Kobylianskyi, B. (2020). Multiobjective Parametric Synthesis of Robust Control by Rolling Mills Main Electric Drives. In *2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP)*. Kremenchuk, Ukraine, P. 1–4.
  26. Pan, Z., Feng, Y., Bu, F., Zhang, D., Lu, Y., Yang, Z. (2020). Anti-Impact Strategy of PMSM-Based Tension Control System for Flexible Rope Applications. In *2020 XI International Conference on Electrical Power Drive Systems (ICEPDS)*. P. 1–6.
  27. Industrial Diesel Engines 3516. Cat. [Електронний ресурс]. URL: [https://www.cat.com/en\\_US/products/new/power-systems/industrial/industrial-diesel-engines/18397893.html](https://www.cat.com/en_US/products/new/power-systems/industrial/industrial-diesel-engines/18397893.html) (дата звернення: 29.11.2025).
- Маслов Ігор Захарович**<sup>1</sup>, к.т.н., зав. каф. кафедри суднових енергетичних установок і систем, [maslovigor@i.ua](mailto:maslovigor@i.ua), тел. +38 067-369-39-46,
- Кулагін Дмитро Олександрович**<sup>2</sup>, д.т.н., проф. кафедри електропостачання промислових підприємств, [kulagindo@gmail.com](mailto:kulagindo@gmail.com), тел. +38 066-236-52-71,
- <sup>1</sup>Дунайський інститут Національного університету «Одеська морська академія», вул. Фанагорійська, 9, Ізмаїл, Одеська область, 68601.
- <sup>2</sup>Національний університет «Запорізька політехніка», вул. Університетська, 64, Запоріжжя, Запорізька область, 69063.
- Development of a control system for an autonomous transport electrical complex of power supply and legal features of its implementation**
- Abstract. Problem.** The object of the study is the issue of synthesizing a highly efficient and robust control system for the traction asynchronous motor of an autonomous transport electric power complex, as well as analyzing the legal framework for its implementation. **Goal.** The goal of the work is to develop a current regulator capable of ensuring the required quality of transient processes and stability against significant variations in object parameters typical for transport energy installations. **Methodology.** To achieve this goal, the polynomial synthesis method for controllers was applied, based on using the Butterworth distribution for the characteristic polynomial coefficients. This approach allowed for the deliberate formation of desired dynamic characteristics, avoiding overshoot and ensuring high response speed. **Results.** The research resulted in the synthesis and analysis of a regulator that demon-

*strates significantly higher robustness compared to traditional controllers, maintaining stable characteristics despite fluctuations in the motor's active resistance caused by temperature changes. This confirms its practical suitability for use in complex operating conditions. Furthermore, the legal aspects of integrating such autonomous complexes into Ukraine's transport (rail, wheeled, water) and energy infrastructure were analyzed. The necessity of harmonizing national legislation with European directives, particularly concerning the implementation of smart grids and distributed generation, is emphasized.*

**Originality.** *The originality lies in the application of the polynomial synthesis method with Butterworth distribution to the current control loop of the traction asynchronous motor of an autonomous complex, ensuring superior robustness and stability under wide parameter variations, which is vital for transport applications.*

**Keywords:** *power plant, automatic control, autonomous voltage inverter, electrical apparatus, electrical machines, mathematical modelling, electrical systems and networks.*

**Maslov Igor**<sup>1</sup>, PhD, Head of the Department of Ship Power Plants and Systems,  
ORCID: 0000-0003-1759-6077,  
[maslovigor@i.ua](mailto:maslovigor@i.ua),  
tel. +38 067-369-39-46,

**Dmytro Kulagin**<sup>2</sup>, Dr. Sc., Prof. of the Department of Power Supply of Industrial Enterprises,  
ORCID: 0000-0003-3610-4250,  
e-mail: [kulagindo@gmail.com](mailto:kulagindo@gmail.com),  
tel. +38 066-236-52-71.

<sup>1</sup>Danube Institute of the National University "Odesa Maritime Academy", 9 Fanagoriyska str., Izmail, Odesa region, 68601,

<sup>2</sup>National University "Zaporizhzhia Polytechnic". 64 Universytetska str., Zaporizhzhia, Zaporizhzhia region, 69063, Ukraine.

*Стаття надійшла до редакції / Received:*  
08.01.2026.

*Прийнята до друку після рецензування / Revised and Accepted:* 16.01.2026.

*Дата публікації статті / Published:* 11.05.2026.

---