

І. І. Яремак<sup>1</sup>  
І. В. Гладь<sup>1</sup>  
Р. О. Яремак<sup>1</sup>

## МОДЕЛЬ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ НАСОСНОЮ СТАНЦІЄЮ НА ЗАСАДАХ ТЕОРІЇ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ

<sup>1</sup>Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

*Запропоновано системний підхід до моделювання та керування режимами роботи насосної станції з електроприводними насосними агрегатами на засадах теорії електричних кіл і принципів системного аналізу. Застосовано математичну модель насосної станції, побудовану на основі методу електрогідравлічної аналогії та теорії кіл, яка адекватно відтворює взаємодію електричної, механічної та гідравлічної підсистем, об'єднаних спільним енергетичним процесом перетворення електричної енергії у гідравлічну.*

*Сформовано комплексну модель системи керування, що забезпечує врахування впливу технологічних, енергетичних, конструктивних і режимних параметрів на ефективність та надійність функціонування насосної станції. Досліджено закономірності взаємодії підсистем різної фізичної природи та встановлено залежності, які дають змогу реалізувати узгоджене регулювання режимів роботи електричних двигунів і насосів з метою підтримання оптимальних характеристик витрати та тиску. Запропоновано структурну схему автоматизованої системи керування технологічним процесом, побудовану за ієрархічним принципом і реалізовану на трьох рівнях — верхньому, середньому та нижньому. Така архітектура забезпечує централізований контроль, локальне керування та безпосередню взаємодію з об'єктами автоматизації. Розроблено математичну модель системи керування насосної станції у вигляді поліоптимізаційної задачі, що враховує локальні й глобальні критерії оптимальності, спрямовані на мінімізацію енергетичних витрат, підвищення ефективності електричних двигунів і насосних агрегатів та забезпечення їхньої надійності.*

*Створено програмне забезпечення для багатокритеріальної оптимізації режимів роботи насосної станції, яке дозволяє оперативно формувати цільові функції та визначати оптимальні значення витратного навантаження. Апробація системи проведена на насосній станції з трьома послідовно увімкненими електроприводними насосними агрегатами, показала ефективність і надійність роботи запропонованої моделі та можливість її інтеграції в наявну автоматизовану систему керування. Результати демонструють здатність системи керування підтримувати оптимальні режими функціонування, підвищувати ефективність і надійність насосних агрегатів, а також забезпечувати узгоджене виконання багаточільових завдань у реальному часі.*

**Ключові слова:** система керування, насосна станція, теорія електричних кіл, схема заміщення, автоматизація.

### Вступ

Керування режимами роботи складної технічної системи, зокрема насосної станції (НС) з електроприводними насосними агрегатами (НА), потребує розроблення математичних моделей, які здатні адекватно відтворювати складні взаємопов'язані фізичні процеси в системі. Такі моделі можна побудувати й дослідити на основі системного підходу [1] та єдиної теорії кіл [2] шляхом синтезу схем заміщення окремих підсистем. У межах системного підходу на етапі аналізу складна технічна система розглядається як сукупність п'яти основних підсистем різної фізичної природи [1], а саме: електричної, механічної поступального руху, механічної обертового руху, гідравлічної (пневматичної) та теплової. Для дослідження режимів станції в [3] сформовано модель НС, що складається з взаємно зв'язаних електричної і гідравлічної підсистем, обмін енергією між якими відбувається через вали НА механічної підсистеми. Кожну підсистему представлено еквівалентним розрахунковим системним колом, що складається зі з'єднаних активних та пасивних елементів.

тів, через які генерується, трансформується, передається та споживається енергія. Для моделювання електричної та гідравлічної підсистем використано узагальнену теорію кіл Кірхгофа [2]. Таким чином комплексну математично-графічну модель НА представлено у вигляді еквівалентної схеми заміщення з активно-індуктивними елементами, яка враховує конструктивні особливості електричної та гідравлічної машини та властивості робочої рідини. Запропонована модель [3] дає можливість дослідити ефективність та надійність роботи електричних двигунів та насосів НС. Таким чином застосування принципів теорії електричних кіл у механіці та гідравліці дозволило трансформувати основні електричні рівняння у відповідні механічні та гідравлічні співвідношення. Це дає можливість формувати схеми кіл підсистем різної фізичної природи та аналізувати їх.

Запропонований підхід, заснований на теорії електричних кіл, доцільно застосувати і для формування математичної моделі системи керування НС. З цією метою НС необхідно представити як об'єкт керування, для якого можна виокремити характерні ознаки. Зокрема, система має складну структуру, що включає взаємопов'язані підсистеми різної фізичної природи: електричну, гідравлічну та механічну. Ці підсистеми взаємодіють між собою, що зумовлює необхідність узгодженого керування ними за різними критеріями. Водночас система має обмежену автономність окремих елементів, що потребує координації їхнього спільного функціонування. Структура системи керування НС є ієрархічною, оскільки вона передбачає досягнення як глобальної мети (мінімізації вартості перекачування рідини), так і локальних цілей окремих підсистем, таких як максимізація ефективності та надійності роботи електричної та гідравлічної підсистем, а також зниження питомих втрат енергії. Таким чином, застосування підходу на основі теорії електричних кіл забезпечує системність і узгодженість у моделюванні взаємодії підсистем різної фізичної природи в процесі керування НС.

У зв'язку з цим виникає потреба у розробленні моделі системи керування насосною станцією на засадах теорії електричних кіл, спрямованої на підвищення показників ефективності та надійності її підсистем. Такий підхід забезпечить комплексний характер моделювання, що враховує взаємозв'язки між електричними, гідравлічними та механічними процесами, і дозволить здійснювати оптимальне керування функціонуванням НС загалом.

*Метою роботи* є розроблення моделі системи керування насосною станцією на основі теорії електричних кіл, яка дасть змогу аналізувати поведінку системи, оптимізувати її параметри, виявляти потенційні несправності та забезпечувати надійну автоматизацію роботи станції відповідно до заданих умов.

### Результати дослідження

Складність керування роботою НС зумовлена нерівномірністю її робочих режимів. На функціонування відцентрового насоса (ВН) впливають три основні групи факторів [4]: зміни в роботі обладнання НС, зміни умов експлуатації технологічної ділянки нафтопроводу та зміна властивостей перекачуваної рідини. Унаслідок цього відбувається зміщення робочої точки системи (рис. 1), що потребує її стабілізації в зоні високих коефіцієнтів корисної дії НА шляхом регулювання робочих режимів. В численних теоретичних дослідженнях [5]—[7] аналізуються методи регулювання режимів роботи насосів, серед яких виділяють: зміну параметрів НС — кількості робочих НА, схеми їхнього з'єднання, заміну роторів (робочих коліс), зміну діаметрів або обточування робочих коліс, регулювання швидкості обертання валів, а також методи, пов'язані зі зміною параметрів самого трубопроводу, такі як дроселювання або байпасування. Для реалізації вищезгаданих методів регулювання режимів на НС магістральних нафтопроводів застосовується автоматизована система керування (АСК).

Наразі спостерігається стійка тенденція заміни релейних пристроїв автоматизації НС на мікропроцесорні, що забезпечує підвищення швидкодії АСК, збільшення їхньої ефективності та зменшення числа аварійних ситуацій. АСК технологічним процесом (ТП) НС побудована як ієрархічна систе-

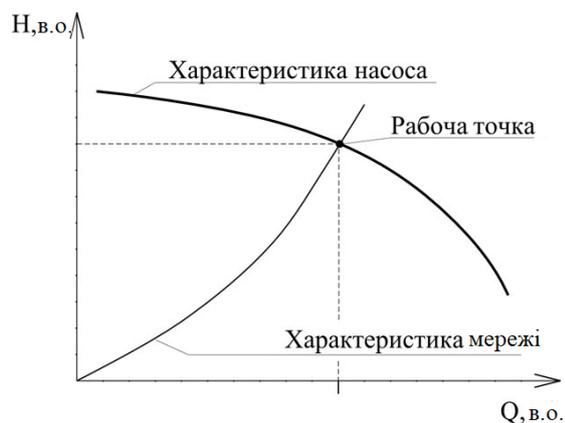


Рис. 1. Робоча точка системи та суміщені напірні характеристики насосів та трубопроводу

ма з розподіленими мікропроцесорними елементами. Архітектура системи керування трирівнева: верхній, середній та нижній рівні. Верхній рівень забезпечує централізований контроль і управління ТП НС з центрального диспетчерського пункту (ЦДП). Середній рівень здійснює контроль і керування з місцевого диспетчерського пункту (МДП) та функціонує безперервно в інформаційному режимі, виконуючи керувальні функції за вказівкою ЦДП у разі позаштатних ситуацій. Обмін даними між верхнім і середнім рівнями керування відбувається через канали зв'язку. На нижньому рівні розташовані датчики технологічних параметрів, пристрої вимірювальних приладів та виконавчі механізми. Взаємодія між середнім і нижнім рівнями здійснюється через канали зв'язку, передбачені виробником обладнання АСК ТП. Користувачами системи керування АСК ТП НС є диспетчер ЦДП, диспетчер МДП та адміністрація об'єкта.

АСК ТП на насосних станціях забезпечують централізоване керування основними та допоміжними об'єктами, а також безперервний моніторинг технологічних параметрів станції. Відомо, що електроприводні НА НС часто працюють у нерациональних, відмінних від проєктних, недовантажених режимах, що призводить до суттєвого зниження показників енергоефективності та надійності їхньої роботи. З метою підвищення ефективності функціонування системи до складу ланки керування доцільно включити блок, який дозволить визначати оптимальні режими роботи НА НС, а система керування забезпечуватиме реалізацію цих режимів. Таким чином, АСК ТП виконуватиме функції контролю, захисту, сигналізації, регулювання та оптимального керування техно-

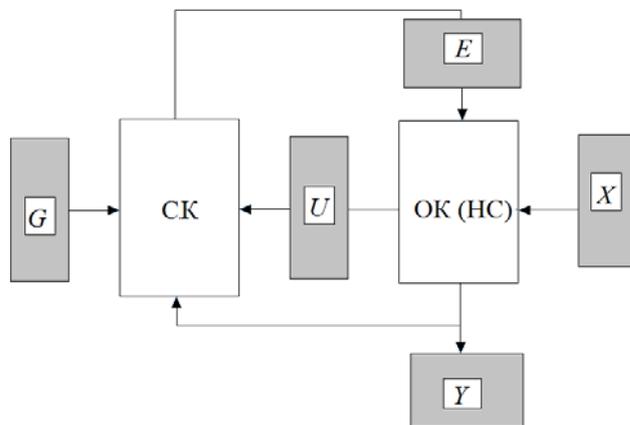


Рис. 2. Структурна схема моделі системи керування насосної станції

логічними процесами усіх об'єктів, що входять до складу НС. Оскільки критерієм керування є підтримання параметрів режиму функціонування в межах допустимих технологічних значень з мінімізацією витрат на експлуатацію та ремонт, виникає необхідність розроблення системи керування, яка забезпечуватиме визначення та підтримання оптимального режиму роботи насосної станції. З урахуванням цього у роботі розроблено структурну схему запропонованої системи керування, що показана на рис. 2.

Модель системи керування НС (рис. 2) представлена вихідними параметрами — групою  $Y$  (зокрема, значеннями тиску на виході з ВН, витратами та віброшвидкостями у точках підшипникових опор насоса). Вхідні параметри описано факторами групи  $X$ , які не підлягають цілеспрямованому регулюванню. Вони впливають як на контрольовані величини (гідравлічний тиск та об'ємна витрата на вході в НС), так і на неконтрольовані (густина та в'язкість робочої рідини). До цієї групи також належать величини, що залишаються незмінними протягом усього процесу перекачування: типи ВН та приводного електродвигуна (ЕД), параметри трубопроводу, частота живлення статорної обмотки ЕД тощо.

Окрім факторів  $X$  і  $Y$ , роботу НС визначають також фактори групи  $U$ . До цієї групи віднесено керувані вхідні величини, через які реалізується процес перекачування: кількість увімкнених НА, положення дросельовальних засувки на виході ВН, діаметри змінних робочих коліс ВН та струм збудження ротора ЕД. У випадку встановлення на НС регульованих НА, група  $U$  додатково включає напругу та частоту живлення статорних обмоток приводного ЕД. Інформація про поточні значення факторів груп  $U$  та  $Y$  надходить у систему керування, де вони порівнюються з параметрами групи  $G$  (оптимізовані характеристики НС, визначені методами багаточислової оптимізації). Максимальне наближення характеристик станції до оптимальних режимів, які представлені в моделі системи керування параметрами групи  $G$ , дає можливість реалізувати такий процес перетворення електричної енергії в гідравлічну в НА, за якого НА НС працює максимально ефективно та надійно з одночасним дотриманням обмежень і вимог, зумовлених значеннями основних режимних параметрів. У результаті система автоматизації формує керувальні дії, представлені факторами групи  $E$  (положення дросельовальних засувки на виході ВН та швидкість обертання роторів НА), які впливають на об'єкт керування.

Знаходження оптимальних керувальних дій, що забезпечують оптимізацію процесу перекачування рідини, формалізується як задача багатокритеріального керування. Для визначення оптима-

льного режиму роботи НС МН сформовано послідовність етапів розв'язання задачі, яка включає:

- математичний опис об'єкта оптимізації;
- визначення мети оптимізації;
- опис середовища функціонування об'єкта оптимізації;
- формалізацію локальних і глобального критеріїв оптимальності, що мають екстремум у робочому діапазоні та визначають оптимальний режим роботи.

Електротехнологічний процес перетворення електричної енергії в гідравлічну подано у вигляді узагальненого відображення

$$\bar{\Phi}: \bar{X} \Rightarrow \bar{Y} | \bar{B}, \bar{M}, t, \quad (1)$$

де  $\bar{\Phi}$  — узагальнений оператор.

Система керування здійснює оптимізацію  $\bar{\Phi}$

$$Y(\bar{X}) = \Phi(\bar{X}) \rightarrow Opt \Phi(\bar{X}, B, M, t), \quad (2)$$

де  $B_i$  та  $M_i$  — значення параметрів електричної та гідравлічної підсистем НС.

Для перевірки ефективності роботи розроблену систему керування апробовано на насосній станції, на якій встановлено три послідовно увімкнені НА, що складаються з електродвигунів типу СТД-2500-2 та насосів типу НМ-3600-230. Математична модель електричної та гідравлічної системи НС та ділянки трубопроводу представлена на основі теорії кіл у вигляді схем заміщень та рівнянь в [7], [8]. Математична модель сформована таким чином, що її вихідні характеристики одночасно слугують критеріями керування для розробленої в цій роботі системи керування (рис. 2). У зв'язку з цим модель використано як основу для подальшого моделювання системи керування НС та аналізу режимів її роботи. У цьому випадку модель системи керування роботою НС представлено у вигляді (3)

$$\left. \begin{aligned} \Phi_1 = f_1(Q) &\Rightarrow \max, \\ \Phi_2 = f_2(Q) &\Rightarrow \max, \\ \Phi_3 = f_3(Q) &\Rightarrow \max, \\ \Phi_4 = f_4(Q) &\Rightarrow \max, \\ Q &\in \Omega, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

де  $\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3, \Phi_4$  — функції критеріїв керування насосних агрегатів;

$\Omega = \{Q \in R | Q_{\min} \leq Q \leq Q_{\max}\}$  — область допустимих значень витрати рідини, яка визначається технологічними обмеженнями.

Критерії керування  $\Phi_1, \Phi_2$  характеризують ефективність, а критерії  $\Phi_3, \Phi_4$  — надійність роботи відповідно електричної (синхронних електродвигунів (СД)) та гідравлічної (відцентрових насосів (ВН)) підсистем залежно від витратного навантаження  $Q$ . Для розрахунку оптимальних значень критеріїв керування розроблено програмне забезпечення, яке обчислює максимальні значення функцій  $\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3, \Phi_4$  (ці функції представлено у вигляді поліномів з коефіцієнтами  $a_i, b_i, c_i, d_i$  (рис. 3)). Глобальне оптимальне значення витратного навантаження насосного агрегату (НА) визначається за допомогою методу зваженої суми критеріїв як скалярного методу багатокритеріальної оптимізації, який характеризується формалізованою інтеграцією різнорідних локальних критеріїв у єдину цільову функцію, аналітично обґрунтовану простою реалізацією та високою ефективністю для комплексних систем. Інтерфейс розробленого програмного забезпечення показано на рис. 3.

|                           | a0      | a1       | a2       | a3       |
|---------------------------|---------|----------|----------|----------|
| Ефективність ВН, $\Phi_1$ | 0,01381 | 1,43234  | -0,33929 | -0,24306 |
|                           | b0      | b1       | b2       | b3       |
| Ефективність СД, $\Phi_2$ | 0,9011  | 0,21819  | -0,19673 | 0,05556  |
|                           | c0      | c1       | c2       | c3       |
| Надійність ВН, $\Phi_3$   | -27,43  | 74,55    | -59,71   | 13,33    |
|                           | d0      | d1       | d2       | d3       |
| Надійність СД, $\Phi_4$   | 1,17801 | -1,92465 | 1,48435  | -0,53316 |
| Вагові коефіцієнти        | a11     | a12      | a13      | a14      |
|                           | 0,4     | 0,34     | 0,16     | 0,1      |

|      |                                   |           |              |
|------|-----------------------------------|-----------|--------------|
| Qпоч | <input type="text" value="0"/>    | Обчислити | Оптимізувати |
| Крок | <input type="text" value="0,02"/> |           |              |
| Qкін | <input type="text" value="1,2"/>  |           |              |

Графіки

Рис. 3. Інтерфейс програмного середовища

Розроблене програмне забезпечення дозволяє оперативно формувати локальні та глобальну цільові функції критеріїв керування та визначати їхні оптимальні значення. Рис. 4 ілюструє результати моделювання шляхом побудови глобальної цільової функції  $M$  у відносних одиницях (в.о.) на основі чотирьох критеріїв керування на НС: енергоефективності ВН ( $\Phi_1$ ), енергоефективності СД ( $\Phi_2$ ), надійності ВН ( $\Phi_3$ ) та надійності СД ( $\Phi_4$ ). Моделювання виконано для трьох послідовно увімкнених НА, що складаються з електродвигунів типу СТД-2500-2 та насосів типу НМ-3600-230. Запропонований підхід дозволив визначити оптимальне значення витратного навантаження станції  $Q_{\text{опт}}$ , а розроблена система керування забезпечить його встановлення. Для оцінки економічної ефективності роботи НС із заданим поліоптимальним значенням витрати  $Q_{\text{опт}}$  цільову функцію варто представити у вигляді функції корисності з вартісною розмірністю. Такий перехід завжди має суб'єктивний характер і потребує додаткових досліджень, оскільки вимагає визначення ціни компромісу для кожної цільової функції у грошовому еквіваленті.

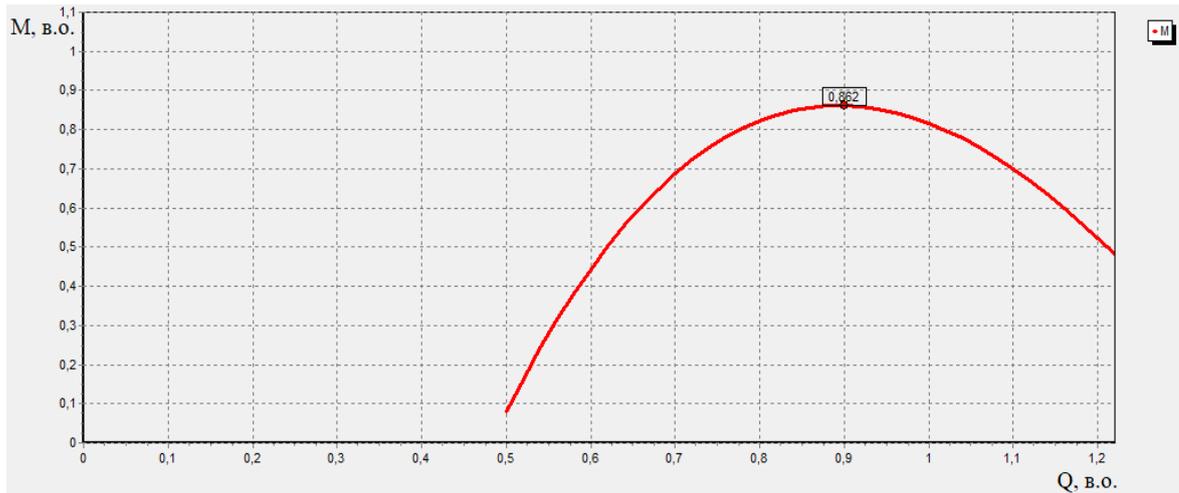


Рис. 4. Глобальна цільова функція системи керування режимами НС

Таким чином, розроблена система керування НС встановлює режим функціонування, максимально наближений до розрахованого оптимального значення витрати, у межах допустимих технологічних параметрів, шляхом регулювання положення засувки або частоти (у разі наявності регульованого електроприводу на НС). Завдяки цьому система дозволяє підтримувати оптимальний режим роботи, підвищуючи ефективність і надійність насосних агрегатів. Більше того, вона забезпечує поетапне розв'язання багатоцільових задач і може бути інтегрована в наявну систему керування НС.

### Висновки

Розроблено комплексну модель системи керування НС на основі теорії електричних кіл та методу електрогідравлічної аналогії, яка адекватно відтворює взаємодію електричної, механічної та гідравлічної підсистем і дозволяє прогнозувати поведінку системи за різних режимних та конструктивних параметрів. Модель забезпечує узгоджене регулювання режимів роботи електродвигунів і насосів з урахуванням технологічних та енергетичних факторів, що дозволяє підтримувати оптимальні значення витрати.

Застосовано системний підхід і створено програмне забезпечення для багатокритеріальної оптимізації, яке на основі методу зважених сум формує глобальний критерій оптимальності, визначає оптимальні значення витратного навантаження та забезпечує ефективне прийняття рішень у реальному часі.

Розроблена модель системи керування НС встановлює режим роботи, максимально наближений до розрахованого оптимального значення витратного навантаження. Інтеграція системи в наявну автоматизовану систему керування технологічним процесом МН дозволяє узгодити керувальні програми диспетчерського пункту, забезпечити їхню безперебійну роботу, підтримувати оптимальний режим функціонування та підвищувати ефективність і надійність насосних агрегатів.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] В. С. Костишин, і І. І. Яремак, «Аналіз показників ефективності та надійності роботи насосного агрегата на засадах системного підходу,» *Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ*, № 1 (62), с. 50-60, 2017.
- [2] E. H. Crapper, *Electric and Magnetic Circuits*. Legare Street Press, 2023, 390 p.

[3] V. S. Kostyshyn, and I. I. Yaremak, “Mathematical model of reliability and efficiency of pumping unit of an oil pumping station,” *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, № 5, pp. 62-68, 2017.

[4] I. Morshch, “Analysis of the causes of damage to centrifugal pumps during operation and methods of their elimination,” *Problems of Tribology*, vol. 30, no. 1/115, pp. 60-65, 2025. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2025-115-1-60-65>.

[5] Y. Zhao, P. Zhang, Y. Pu, H. Lei, and X. Zheng, “Unit Operation Combination and Flow Distribution Scheme of Water Pump Station System Based on Genetic Algorithm,” *Appl. Sci.*, vol. 13, pp. 11869, 2023. <https://doi.org/10.3390/app132111869>.

[6] P. Xu, and S. Zhang, “Design of Monitoring and Control System of Hydraulic Pump Station Based on Internet of Things,” *Aut. Control Comp. Sci.*, vol. 59, pp. 340-348, 2025. <https://doi.org/10.3103/S0146411625700506>.

[7] I. I. Яремак, «Багатоцільова оптимізація усталених режимів роботи електроприводних насосних станцій магістральних нафтопроводів.» дис. канд. техн. наук, Івано-Франківський нац. техн. ун-т нафти і газу, Івано-Франківськ, 2018, 201 с.

[8] I. I. Яремак, В. С. Костишин, і А. В. Костишин, «Розрахунок показників енергоефективності режимів роботи нафтоперекачувальної станції, обладнаної відцентровими насосами зі синхронним електроприводом.» *Науковий вісник НЛТУ України*, вип. 27(3), с. 166-170, 2017.

Рекомендована оргкомітетом міжнародної науково-технічної конференції  
«Оптимальне керування електроустановками (ОКЕУ-2025)»

Стаття надійшла до редакції 8.12.2025

**Яремак Ірина Ігорівна** — канд. техн. наук, доцент кафедри електричної інженерії, e-mail: yaremak\_iryua@ukr.net ;

**Гладь Іван Васильович** — канд. техн. наук, доцент кафедри електричної інженерії, e-mail: ivan.hlad@nung.edu.ua ;

**Яремак Роман Олександрович** — магістр кафедри електричної інженерії, e-mail: yaremakroma@gmail.com .  
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ

**I. I. Yaremak<sup>1</sup>**  
**I. V. Hlad<sup>1</sup>**  
**R. O. Yaremak<sup>1</sup>**

## Model of the Pumping Station Control System, Based on the Principles of Electric Circuit Theory

<sup>1</sup>Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

*Systemic approach to modeling and controlling the operating modes of a pumping station with electrically driven pump units, based on electric circuit theory and principles of system analysis is proposed. Mathematical model of the pumping station, constructed using the electro-hydraulic analogy method and circuit theory, has been applied; it adequately reproduces the interaction of the electrical, mechanical, and hydraulic subsystems, united by the shared process of energy conversion from electrical to hydraulic energy.*

*A comprehensive model of the control system has been formulated, it takes into consideration the impact of technological, energy, structural, and operational parameters on the efficiency and reliability of the pumping station. The patterns of interaction among subsystems of different physical nature have been studied, and dependencies, enabling to realize the coordinated regulation of the operating modes of electric motors and pumps to maintain optimal flow and pressure characteristics have been established. Structural scheme of the automated process control system, built according to a hierarchical principle and implemented on three levels — upper, middle, and lower has been proposed. This architecture ensures centralized control, local management, and direct interaction with automation objects. Mathematical model of the pumping station control system has been developed in the form of a multi-objective optimization problem, which considers local and global optimality criteria, aimed at minimizing energy consumption, improving the efficiency of electric motors and pump units, and ensuring their reliability.*

*Software has been created for multi-criteria optimization of the pumping station operating modes, allowing for rapid formation of objective functions and determination of optimal flow load values. The system has been tested on a pumping station with three consecutively connected electrically driven pump units, demonstrating the effectiveness and reliability of the proposed model and its potential for integration into the existing automated control system. The results show the control system's ability to maintain optimal operating modes, enhance the efficiency and reliability of pump units, and ensure coordinated execution of multi-objective tasks in real time.*

**Keywords:** control system, pumping station, electric circuit theory, equivalent circuit, automation.

**Yaremak Iryna I.** — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of the Chair of Electrical Engineering, e-mail: yaremak\_iryua@ukr.net ;

**Hlad Ivan V.** — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of the Chair of Electrical Engineering, e-mail: ivan.hlad@nung.edu.ua;

**Yaremak Roman O.** — Master of the Chair of Electrical Engineering, e-mail: yaremakroma@gmail.com