

## **ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ТРАНСПОРТУВАННЯ ГАЗУ ШЛЯХОМ ОПТИМІЗАЦІЇ РЕЖИМІВ РОБОТИ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ**

© Князєва В.М., Насиров С.В., Малюта В.Є., Курільченко М.О., Колесник В.Б.

*Українська інженерно-педагогічна академія*

### **Інформація про авторів:**

**Князєва Вікторія Миколаївна (Kniazieva Viktoriia):** ORCID:0000-0002-3106-4897; email: vitok911@ukr.net; кандидат технічних наук; доцент кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій; Українська інженерно-педагогічна академія, вул. Університетська 16, м. Харків, 61003, Україна

**Насиров Сергій Володимирович (Nasyrov Serhii):** ORCID:0000-0002-9599-8306; e-mail: nasirov1980@gmail.com; аспірант кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій; Українська інженерно-педагогічна академія, вул. Університетська 16, м. Харків, 61003, Україна.

**Малюта Віталій Євгенович (Maliuta Vitalii):** ORCID:0009-0004-0789-442X; e-mail: Sony199325@gmail.com; аспірант кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій; Українська інженерно-педагогічна академія, вул. Університетська 16, м. Харків, 61003, Україна.

**Курільченко Максим Олександрович (Kurilchenko Maksym):** e-mail: Maximkaa033@gmail.com, аспірант кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій; Українська інженерно-педагогічна академія, вул. Університетська 16, м. Харків, 61003, Україна.

**Колесник Владислав Борисович (Kolesnyk Vladyslav):** ORCID:0009-0007-3409-6062; e-mail: vladkole1994@gmail.com, аспірант кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій; Українська інженерно-педагогічна академія, вул. Університетська 16, м. Харків, 61003, Україна.

Визначено, що оптимальним режимом роботи магістральних газопроводів є максимальне використання їх пропускної спроможності (перекачування газу) при мінімальних витратах енергії на стиснення, охолодження і транспортування та визначається роботою компресорних станцій і характеризується нерівномірністю подачі та споживання газу. Перспективним напрямком удосконалення режимів роботи газопроводів є підтримування максимального розрахункового тиску газу в трубопроводі, знижування температури газу, що перекачується, шляхом його охолодження, а також використання газопроводів більшого діаметру з очищенням внутрішньої порожнини трубопроводу. Розглянуто розроблені принципи енергоефективного транспортування природного газу магістральними газопроводами на основі нормативно-технічних документів. Запропоновано спосіб магістрального транспорту газу, що забезпечує найвищу енергоефективність за будь-яких режимів роботи магістральних газопроводів. Це досягається тим, що температуру і тиск компримованого газу на виході на початку кожної лінійної ділянки вимірюють і автоматично регулюють за умови підтримання їх на оптимальному рівні згідно із завданням і значеннями зовнішніх збурень, що діють на параметри потоку газу в газопроводах. Наведено схему та сучасні технічні засоби частотно-регульованих електроприводів та алгоритми керування технологічними агрегатами компресорних станцій магістрального транспортування газу. Використання запропонованого способу магістрального транспорту газу забезпечує автоматичну стабілізацію тиску й температури газу на виході, і тим самим практично повністю усуває неприпустимі деформації та напружені стани трубопроводу й можливі руйнування його протикорозійної ізоляції, унаслідок чого підвищується експлуатаційна надійність, а також оптимізуються інтегральні енерговитрати на привод компресорів та вентиляторів.

**Ключові слова:** енергоефективність, магістральні газопроводи, компресорні станції з електроприводом, оптимальне управління технологічними агрегатами.

*Kniazieva V., Nasyrov S., Maliuta V., Kurilchenko M., Kolesnyk V.* “Improving the energy efficiency of gas transportation by optimizing the operation modes of electric drives”

The optimal mode of operation for trunk gas pipelines is determined to be the maximum utilization of their throughput capacity (gas transmission) with minimal energy consumption for compression, cooling, and transportation, and is defined by the operation of compressor stations and characterized by the unevenness of gas supply and consumption. A promising direction for improving the operation modes of gas pipelines is maintaining the maximum design pressure of gas in the pipeline, reducing the temperature of the transmitted gas by cooling it, as well as using pipelines with larger diameters with cleaning of the internal cavity of the pipeline. The developed principles of energy-efficient transportation of natural gas through trunk gas pipelines based on regulatory and technical documents are considered. A method of trunk gas transportation is proposed, which ensures the highest energy efficiency under any operating conditions of trunk gas pipelines. This is achieved by measuring and automatically adjusting the temperature and pressure of compressed gas at the outlet at the beginning of each linear section under the condition of maintaining them at an optimal level according to the task and the values of external disturbances acting on the parameters of the gas flow in the pipelines. A diagram and modern technical means of frequency-controlled electric drives and control algorithms for technological units of compressor stations for trunk gas transportation are provided. The use of the proposed method of trunk gas transportation ensures automatic stabilization of pressure and temperature of the gas at the outlet, thereby practically completely eliminating unacceptable deformations and stress states of the pipeline and possible destruction of its anti-corrosion insulation, which increases operational reliability and optimizes the integral energy costs for driving compressors and fans.

**Key words:** energy efficiency, trunk gas pipelines, compressor stations with electric drive, optimal control of technological units.

### **Постановка проблеми**

Оптимальним режимом роботи магістральних газопроводів (МГ) є максимальне використання їх пропускної спроможності (перекачування газу) при мінімальних витратах енергії на стиснення, охолодження і транспортування. Значною мірою цей режим визначається роботою компресорних станцій (КС) і характеризується нерівномірністю подачі та споживання газу протягом року, місяця та доби, незважаючи на наявність газосховищ, а також науково обґрунтовані нормативні методи оптимізації [1, 2].

З метою зниження енергоспоживання компресорної станції для перекачування газу, збільшення пропускної здатності газопроводу і економії енергоресурсів вигідно підтримувати максимальний розрахунковий тиск газу в трубопроводі, знижувати температуру газу, що перекачується шляхом його охолодження, а також використовувати газопроводи більшого діаметру з очищенням внутрішньої порожнини трубопроводу [3].

Аналіз показників, що характеризують експлуатацію газопроводу країни на сьогоднішній день, свідчить про значну амортизацію, зниження технічного стану і продуктивності основних агрегатів компресорної станції [4]. Середній вік газопроводів в Україні становить 22 роки, більшість з яких (близько 80%) мають вік від 15 до 40 років, що перевищує нормативні показники.

### **Аналіз останніх досліджень і публікацій**

Останніми роками інтерес до проблем енергоефективності та енергозбереження на МГ значно зріс на рівні розроблення нових концепцій оптимального управління [5-8], реалізації інтелектуальних і малолюдних технологій функціонування [9-10], технічних рішень щодо застосування нової техніки, включно з високовольтними багаторівневими перетворювачами частоти [11, 12]. З'явилися перші реалізації подібних систем для основних технологічних установок КС (рис. 1) – електроприводних газоперекачувальних агрегатів (ЕГПА) і апаратів повітряного охолодження газу (АПО) [13, 14].

Всі вищезазначені фактори при системному впровадженні в рамках КС значно підвищують техніко-економічну привабливість і конкурентоспроможність ЕГПА, забезпечуючи виконання основних завдань енергоефективності та безпеки магістральних газопроводів, а також стійкості, надійності та екологічності транспортування енергоресурсів в Україні.

### **Постановка мети та завдання дослідження**

Метою даної роботи є удосконалення систем керування газоперекачувальними агрегатами та підвищення ефективності транспортування газу.

### **Виклад основного матеріалу**

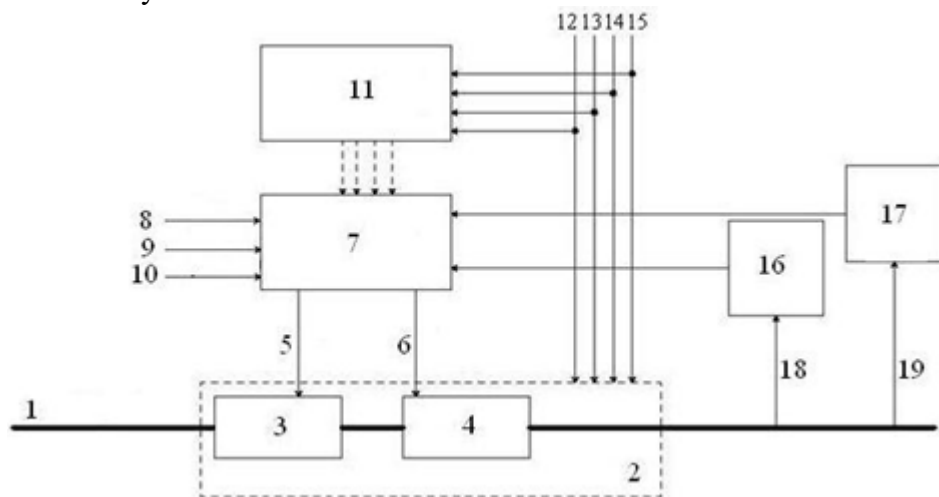
У комплексі засобів автоматизації компресорних цехів (КЦ) слід передбачати системи автоматичного регулювання, що забезпечують підтримання заданих величин тиску й температури газу на виході станції, пристрої антипомпажного регулювання й захисту газоперекачувальних агрегатів (ГПА) [15]. Однак наявні засоби автоматики здебільшого працюють автономно від агрегатів у ручному режимі, виконуючи здебільшого захисні функції, і не забезпечують енергоефективні режими [2,4]. Разом з тим, сьогодні можливості регульованого ЕГПА дають змогу оптимізувати енергоспоживання КЦ з автоматичним стеженням за обуреннями детермінованого та стохастичного характеру [16].



**Рис. 1** - Варіанти нових моноблочних електроприводних газоперекачувальних агрегатів для енергоефективного транспорту газу

Запропоновано спосіб магістрального транспорту газу, що забезпечує найвищу енергоефективність за будь-яких режимів роботи магістральних газопроводів (рис. 2). Це досягається тим, що температуру і тиск компримованого газу на виході всіх КС на початку кожної лінійної ділянки МГ вимірюють і автоматично регулюють за умови підтримання їх на оптимальному рівні згідно із завданням і значеннями зовнішніх збурень, що діють на параметри потоку газу в газопроводах [17].

Порівняльний аналіз цього способу, який полягає у формуванні тиску й температури потоку стисненого газу по всій трасі МГ за допомогою ЕГПА та вентиляторів АПО, встановлених на всіх КС на початку кожної лінійної ділянки МГ, з аналогами показує, що запропонований спосіб магістрального транспорту газу відрізняється від відомих тим, що в ньому автоматично встановлюються та плавно регулюються величини тиску та температури газу за допомогою регульованих ЕГПА та АПО залежно від поточних значень тиску та температури газу в МГ, які вимірюють за допомогою ЕГПА і АПО залежно від поточного значення тиску та температури газу в МГ, що вимірюється з допомогою ЕГПА. Також величин збурювальних впливів стохастичного характеру і, тим самим, мінімізуються параметричні зміни тиску і температури газопроводу, що підвищує його експлуатаційну надійність, а також мінімізуються інтегральні енерговитрати на привід ЕГПА та вентиляторів АПО газу.



**Рис. 2 - Структура енергоефективного транспорту газу через електроприводну компресорну станцію**

1 – лінійна частина МГ, 2 – КС, 3 – ЕГПА, 4 – АПО газу, 5 і 6 – швидкості обертання приводів ЕГПА ( $\omega_{\text{зад.ЕГПА}}$ ) і вентиляторів АПО, 7 – блок розрахунку параметрів регулювання, 8, 9, 10 - задані значення продуктивності, тиску і температури газу, 11 – датчики вимірювання зовнішніх впливів, 12 – вологість повітря ( $\beta$ ), 13 – температура повітря ( $\theta$ ), 14 – перепад температур ( $\Delta t$ ) або тисків на КС ( $\Delta P$ ), 15 – продуктивність КС ( $Q$ ), 16 і 17 – датчики тиску і температури газу, що вимірюють 18 і 19 – реальні значення тиску і температури газу на виході КС

Як вихідний стан оптимізації необхідно вибрати інтервали значень змінних, що змінюються безперервно, і набори значень дискретних змінних. При цьому досягається мінімум цільової функції, яка має такий трифакторний вигляд:

$$G = \alpha \times R + \beta \times W + \gamma \times C, \quad (1)$$

де  $\alpha$ ,  $\beta$  і  $\gamma$  – вагові коефіцієнти,  $R$  – фактор "режиму", тобто мінімізації (максимізації) тиску в певних точках ГТС, як-от будь-які точки, розташовані вище й нижче КС або регулюючого вентиля, а також пристрої споживання газу,  $W$  – фактор "енергії" або мінімізації споживання

електроенергії на компримування газу та його охолодження в АПО перед подачею в газопровід,  $C$  – фактор "цілі", тобто максимізації (мінімізації) витрати газу на ділянці системи, розташованій між двома точками газопроводу, або тиску в певній точці з'єднання газопроводу або у певній точці з'єднання, або в певній точці газопроводу, або у точці з'єднання газопроводу, а також пристрої споживання газу, тобто максимізації (мінімізації) витрати газу на ділянці системи, розташованій між двома точками газопроводу, або тиску в певній точці з'єднання.

Зазначені обмеження містять обмеження рівності, до яких входять закон втрати напору в трубопроводах і перше правило Кірхгофа, що визначають розрахунки мереж, та обмеження нерівності, до яких входять обмеження на мінімальні та максимальні значення витрати газу, обмеження на мінімальний і максимальний тиск в активних або пасивних об'єктах і обмеження потужності ЕГПА КС.

Оптимальна конфігурація активних об'єктів КС моделюється у вигляді програми  $P$  оптимізації такого вигляду:

$$\begin{cases} \min_{\{x,s,e\}} f(x,s) = G(x) + \alpha \cdot \|S\| \\ P = C_1(x) + \beta \cdot e \leq s_I \\ C_E(x) = s_E \end{cases} \quad (2)$$

де  $x \in R^n$ ,  $s_I \in R^p$ ,  $s_E \in R^q$ ,  $e \in \{0,1\}$ ,  $x$  – сукупність змінних витрати газу  $Q$  і тиску  $P$ ,  $G(x)$  – цільова функція, що являє собою економічний критерій оптимізації,  $C_1(x)$  – сукупність  $p$  лінійних і нелінійних обмежень нерівності для активних об'єктів,  $\beta$  – вектор, коефіцієнти якого дорівнюють нулю або максимальним значенням обмежень,  $e$  – вектор двійкових змінних,  $C_E(x)$  – сукупність  $q$  лінійних і нелінійних обмежень рівності,  $s$  – змінна відхилення, ненульове значення якої позначає порушення обмеження,  $\alpha$  – коефіцієнт, відповідний допустимому ступеню порушення обмежень.

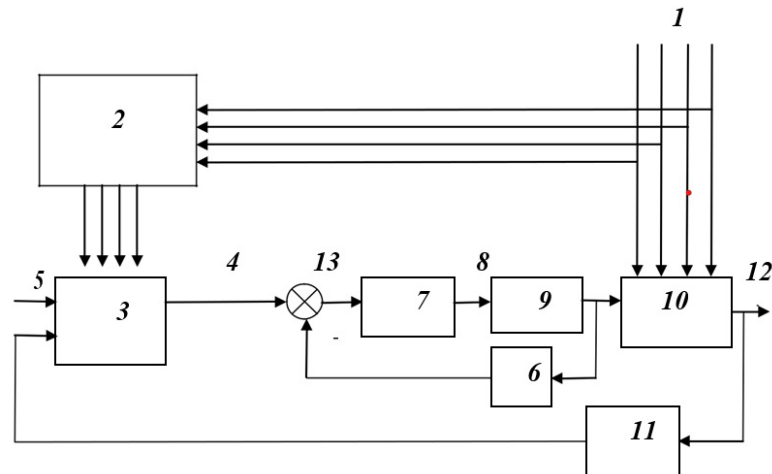
У результаті за заданої витрати газу 8 (рис. 2) тиск 19 і температура 18 газу на виході КС встановлюються і стабілізуються на заданому оптимальному з енергоспоживання КС рівні. Цей спосіб магістрального транспорту газу при цьому являє собою надійну і довговічну в експлуатації систему, що обмежує перевищення тиску і температури газу вище і нижче граничних значень.

Використання запропонованого способу керування магістрального транспорту газу забезпечує, порівняно з наявними способами, автоматичну стабілізацію тиску й температури газу на виході КС, і тим самим практично повністю усуває неприпустимі деформації та напружені стани трубопроводу й можливі руйнування його протикорозійної ізоляції, унаслідок чого підвищується експлуатаційна надійність, а також оптимізуються інтегральні енерговитрати на привод ЕГПА та вентиляторів АПО газу магістральних газопроводів.

Для реалізації цієї енергоефективної технологічної схеми система електроприводу ЕГПА має бути частотно-регульованою та інваріантною до всіх параметрів-збурень детермінованого та стохастичного характеру [7, 12], тобто комбінованою САР (за відхиленням і збуренням) з негативним зворотним зв'язком за головним технологічним параметром – тиском газу на виході компресорної станції. Така система, розроблена за участю автора, показана на рис. 3.

Об'єктом управління для електроприводу 9 є газоперекачувальний агрегат 10, на вхід якого підводиться газ. Підвищення тиску (компримування) газу відбувається за рахунок політропної роботи компресорів ГПА. Обертання газоперекачувального агрегату 10 забезпечує двигун 9 із пристроєм зміни його частоти обертання (ПЧ) із законом керування  $U/f^2 = \text{const}$  ( $U, f$  – напруга і частота напруги, що живить двигун). На вхід блока 3 розрахунку необхідної швидкості обертання надходять сигнали про величину впливів, що впливають на оберти, з датчиків 2 вимірювання зовнішніх впливів 1 і сигнал завдання тиску 5, який коригується з

датчика тиску 11. Динамічні коливання швидкості обертання електропривода ГПА 9 надходять на датчик швидкості обертання 6 і далі на другий вхід суматора 13. Сигнал 4 з виходу блока 3 розрахунку необхідної швидкості обертання електропривода ГПА надходить на суматор 13, де коригується сигналом з датчика швидкості 6. Сигнал із суматора 13 надходить на ПІ-регулятор 7, на виході якого формується сигнал 8, пропорційний необхідній швидкості обертання електропривода 9. Газоперекачувальний агрегат 10, що обертається електроприводом 9, створює необхідний тиск газу на виході компресорної станції 12.



**Рис. 3** - Структура інваріантної системи частотно-регульованого ЕГПА

Дана комбінована система, що складається з САР за відхиленням (тиску газу) і САР за збуренням (стохастичних збурень), забезпечує автоматизацію процесу компримування газу до оптимального стабільного тиску в умовах різних випадкових впливів засобами інваріантної системи керування частотно-регульованого ЕГПА. При цьому вирішується шукане завдання підвищення точності відпрацювання необхідної величини тиску газу на виході КС і стабілізації процесу компримування газу засобами ЕГПА. Цьому сприяє суворе дотримання параметрів основного технологічного процесу компримування газу, що дає змогу підвищити продуктивність і надійність газопроводу в умовах дії збурливих впливів [15, 16]. Дана комбінована система, що складається з САР за відхиленням (тиску газу) і САР за збуренням (стохастичних збурень), забезпечує автоматизацію процесу компримування газу до оптимального стабільного тиску в умовах різних випадкових впливів засобами інваріантної системи керування частотно-регульованого ЕГПА. При цьому вирішується шукане завдання підвищення точності відпрацювання необхідної величини тиску газу на виході КС і стабілізації процесу компримування газу засобами ЕГПА. Цьому сприяє суворе дотримання параметрів основного технологічного процесу компримування газу, що дає змогу підвищити продуктивність і надійність газопроводу в умовах дії збурливих впливів [15, 16].

За необхідності переведення ЕГПА в турбодетандерний режим роботи необхідно забезпечувати на виході ПЧ параметри напруги за допомогою введення зовнішнього негативного зворотного зв'язку за вихідною напругою, як це виконано в роботах [15, 17].

### Висновки

1. Розроблено структурну схему реалізації енергоефективної технологічної схеми система електроприводу ЕГПА. Привід частотно-регульований та інваріантний до всіх параметрів-збурень детермінованого та стохастичного характеру, тобто САР є комбінована (за відхиленням і збуренням) з негативним зворотним зв'язком за головним технологічним параметром – тиском газу на виході компресорної станції.

2. Наведено комбіновану систему, що складається з САР за відхиленням (тиску газу) і САР за збуренням (стохастичних збурень), що забезпечує автоматизацію процесу

компримування газу до оптимального стабільного тиску в умовах різних випадкових впливів засобами інваріантної системи керування частотно-регульованого ЕГПА. При цьому вирішується шукане завдання підвищення точності відпрацювання необхідної величини тиску газу на виході КС і стабілізації процесу компримування газу засобами ЕГПА.

3. Використання запропонованого способу керування магістрального транспорту газу забезпечує, порівняно з наявними способами, автоматичну стабілізацію тиску й температури газу на виході КС, і тим самим практично повністю усуває неприпустимі деформації та напружені стани трубопроводу й можливі руйнування його протикорозійної ізоляції, унаслідок чого підвищується експлуатаційна надійність, а також оптимізуються інтегральні енерговитрати на привод ЕГПА та вентиляторів АПО газу магістральних газопроводів.

#### **Список використаних джерел:**

1. Аналіз резервов енергосбереження при управленні насосними агрегатами нафтоперекачуючих станцій України / Г. І. Канюк, А. Ю. Мезеря, А. В. Андреев, В. Н. Князева і др. // *Інтегровані технології та енергозбереження*. – 2015. – № 4. – С. 3-14.
2. Аналіз засобів регулювання параметрів насосних агрегатів магістральних нафтопроводів України / Г. І. Канюк, А. В. Андреев, А. М. Чернюк, В. М. Князева та ін. // *Вісник НТУ “ХП”*. Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків, 2016. – № 10 (1182). – С. 85-91.
3. Бабенко І. А. Удосконалення та уніфікація методів забезпечення енергоефективних режимів роботи нагнітальних установок електростанцій : автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Харків, 2017.
4. Андреев А. В. Эффективность управления насосными агрегатами нефтеперекачивающих станций / А. В. Андреев, А. М. Чернюк, В. Н. Князева // *Удосконалення турбоустановок методами математичного і фізичного моделювання : тез. доп. XVI Міжнар. наук.-техн. конф., 10–14 верес. 2017 р. / НАН України, Ін-т проблем машинобудування ім. А. Н. Підгірного НАН України, Турбоатом, Енергопрогрес*. – Харків, 2017. – С. 94-95.
5. Unified basic software and hardware complex for precision energy saving systems of automatic regulation and control / G. I. Kaniuk, A. Yu. Mezeria, V. M. Kniazeva, D. M. Khoroshun, T. N. Fursova // *Радіоелектроніка, інформатика, управління*. – 2019. – № 2. – С. 202-209.
6. Energy Efficient Control by the Group of Oil Pumping Stations Operation / G. I. Kaniuk, A. Yu. Mezeria, V. M. Kniazeva, T. N. Fursova, E. N. Blyznychenko // *Problems of the regional energetics*. – 2021. – № 4. – Р. 13-22.
7. Канюк Г. І. Модель енергосберегаючого управління нагнетательними установками теплових електростанцій / Г. І. Канюк, А. Ю. Мезеря, І. П. Лаптин // *Вісник НТУ “ХП”*: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – 2014. – № 12. – С. 90-97.
8. Чернюк А. М. Повышение уровня энергосбережения при управлении насосными установками нефтеперекачивающих станций / А. М. Чернюк, В. М. Князева // *Информатика, математика, автоматика : материалы науч.-техн. конф.* – Суми, 2016.
9. Сабанин В. Р. Модифицированный генетический алгоритм для задач оптимизации и управления / В. Р. Сабанин, Н. И. Смирнов, А. И. Репин // *Exponents Pro. Математика в приложениях*. – 2004. – № 3/4. – С. 78-85.
10. Шаммазов А. М. Проектирование и эксплуатация насосных и компрессорных станций / А. М. Шаммазов, В. Н. Александров, А. И. Гольянов. – М. : Недра, 2003. – 404 с.
11. Нефтяные магистральные насосы: параллельное или последовательное включение на НПС / И. Б. Твердохлеб, Г. В. Визенков, А. И. Бирюков, Л. М. Беккер // *Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов*. – 2011. – № 2. – С. 17-19.
12. Шабанов В. А. Снижение волн давления в нефтепроводе при частотно-регулируемом электроприводе магистральных насосов / В. А. Шабанов, О. В. Кабаргина, З. Х. Павлова // *Вестник Атырауского института нефти и газа*. – 2011. – № 1(24). – С. 71–76.
13. Bachus L. Know and understand centrifugal pumps / L. Bachus, A. Custodio. – Kidlington, Oxford: UK, 2003. – 265 p.
14. Benra F. K. Measurement of the characteristics of a centrifugal pump: Practical course Turbomachinery / F. K. Benra. – University Duisburg-Essen. – 42 p.
15. Перекрест А. Л. Системы активного регулирования параметров насосных комплексов : монография / А. Л. Перекрест, Т. В. Коренькова, Д. И. Родькин. – Кременчуг : ЧП Щербатых А.В. – 2011. – 180 с.
16. Samolenkov S. V. Determination of the mode working parameters of centrifugal pumps reducing the energy consumption during oil transportation / S. V. Samolenkov, O. V. Kabanov // *Scientific Reports on Resources Issues Freiberg: Technical University Bergakademie*. – 2012. – p. 260-263.
17. Шабанов В. А. Алгоритм оценки эффективности частотно-регулируемого электропривода магистральных насосов эксплуатируемых нефтепроводов по критерию снижения затрат электроэнергии / В. А. Шабанов, Э. Ф. Хакимов, С. Ф. Шарипова // *Электротехнические и информационные комплексы и системы*. – 2013. – № 2 (9). – С. 34–42.

**References:**

1. Kanyuk, GI, Mezerya, AY, Andreev, AV, Knyazeva, TM et al 2015, 'Analiz rezervov energosberezheniya pri upravlenii nasosnyimi agregatami nefteperekachivayuschih stantsiy Ukrainyi' [*Analysis of energy saving reserves in the control of pump units of oil pumping stations in Ukraine*], *Schokvartalniy naukovopraktichniy zhurnal NTU «HPI» Integrovani tehnologiyi ta energosberezheniya*, no 4, Pp. 3-14.
2. Kanyuk, GI, Andreev, AV, Chernyuk, AM, Knyazeva, TM et al 2016, 'Analiz zasobiv reguluyuvannya parametriv nasosnih agregativ magistralnih naftoprovodiv Ukrainyi' [*Analysis of means for regulating parameters of pump units of main oil pipelines in Ukraine*], *Visnik NTU "HPI": Vipusk: Energetichni ta teplotekhnichni protsesi y ustatkuvannya*, no 10, Pp. 85-91.
3. Babenko, IA 2017, 'Udoskonalennya ta unifikatsiya metodiv zabezpechennya energoefektivnih rezhimiv roboti nagnitalnih ustanovok elektrostantsiy' [*Improvement and unification of methods of ensuring energy-efficient operating modes of supercharger units of power plants*], *Kand. tehn.n. abstract*, Harkiv.
4. Andreev, AV, Chernyuk, AM & Knyazeva, VM 2017, 'Effektivnost upravleniya nasosnyimi agregatami nefteperekachivayuschih stantsiy' [*Efficiency of control of pumping units of oil pumping stations*], *Udoskonalennya turbostanovok metodami matematichnogo i fizichnogo modelyuvannya: tez. dop. HVI Mizhnar. nauk.-tehn. konf., 10-14 veresnya 2017 r.*, Harkiv, Pp. 94-95.
5. Kaniuk, GI, Mezerya, AY, Kniazeva, VM, Khoroshun, DM & Fursova, TM 2019, 'Unified basic software and hardware complex for precision energy saving systems of automatic regulation and control' *Radioelektronika, Informatika, upravlinnya*, no 2, Pp. 202-209.
6. Kaniuk, GI, Mezerya, AY, Kniazeva, VM, Fursova, TM & Blyznychenko, EN 2021, 'Energy Efficient Control by the Group of Oil Pumping Stations Operation', *Problems of the regional energetics*, no 4, Pp. 13-22.
7. Kanyuk, GI, Mezerya, AY & Laptinov, IP 2014, 'Model energosberegayuschego upravleniya nagnetatelnyimi ustanovkami teplovyih elektrostantsiy' [*Model of energy-saving control of supercharger units at thermal power plants*], *Visnik NTU "HPI": Energetichni ta teplotekhnichni protsesi y ustatkuvannya*, no 12, Pp. 90-97.
8. Chernyuk, AM & Knyazeva, VM 2016 'Povyishenie urovnya energosberezheniya pri upravlenii nasosnyimi ustanovkami nefteperekachivayuschih stantsiy' [*Increasing the level of energy saving when controlling pumping units of oil pumping stations*], *Informatika, matematika, avtomatika : naukovotehnichna konferentsiya*, Sumi.
9. Sabanin, VR, Smirnov, NI & Repin, AI 2004, 'Modifitsirovannyiy geneticheskiy algoritm dlya zadach optimizatsii i upravleniya' [*Modified genetic algorithm for optimization and control problems*], *Exponents Pro. Matematika v prilozheniyah*, no 3/4, Pp. 78-85.
10. Shammazov, AM, Aleksandrov, AM & Golyanov, AI 2003, *Proektirovanie i ekspluatatsiya nasosnyih i kompressornyih stantsiy [Design and operation of pump and compressor stations]*, Nedra, Moskva.
11. Tverdohleb, IB, Vizenkov, GV, Biryukov, AI & Bekker, LM 2011, 'Neftyanye magistralnyie nasosyi: parallelnoe ili posledovatelnoe vkluchenie na NPS' [*Oil main pumps: parallel or series connection at oil pumping stations*], *Nauka i tehnologii truboprivodnogo transporta nefi i nefteproduktov*, no 2, Pp. 17-19.
12. Shabanov, VA, Kabargina, OV & Pavlova, ZH 2011, 'Snizhenie voln davleniya v nefteprovoде pri chastotno-reguliruemom elektroprivode magistralnyih nasosov' [*Reduction of pressure waves in an oil pipeline with variable-frequency electric drive of main pumps*], *Vestnik Atyrauskogo instituta nefi i gaza*, no 1, Pp. 71-76.
13. Bachus, L & Custodio, A 2003, *Know and understand centrifugal pumps*, Kidlington, Oxford.
14. Benra, FK n. d., *Measurement of the characteristics of a centrifugal pump: Practical course Turbomachinery*, University Duisburg-Essen.
15. Perekrest, AL, Korenkova, TV & Rodkin, DI 2011, *Sistemyi aktivnogo regulirovaniya parametrov nasosnyih kompleksov [Systems for active control of parameters of pumping complexes: monograph]*, ChP Scherbatyih A.B., Kremenchug.
16. Samolenkov, SV & Kabanov, OV 2012, 'Determination of the mode working parameters of centrifugal pumps reducing the energy consumption during oil transportation' *Scientific Reports on Resources Issues Freiberg: Technical University Bergakademie*, Pp. 260-263.
17. Shabanov, VA, Hakimov, EF & Sharipova, SF 2013, 'Algoritm otsenki effektivnosti chastotno-reguliruemogo elektroprivoda magistralnyih nasosov ekspluatiruemyyih nefteprovodov po kriteriyu snizheniya zatrat elektroenergii' [*Algorithm for evaluating the efficiency of the frequency-regulated electric drive of main pumps of operated oil pipelines according to the criterion of reducing electricity costs*], *Elektrotehnicheskie i informatsionnyie kompleksy i sistemy*, no 2, Pp. 34-42.

Стаття надійшла до редакції 24 грудня 2023 року.