

УДК 621.313+621.671:519.816

DOI: 10.31471/1993-9981-2019-1(42)-24-32

ОПТИМІЗАЦІЯ УСТАЛЕНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ ЕЛЕКТРОПРИВОДНИХ НАСОСНИХ АГРЕГАТІВ ЗА КРИТЕРІЯМИ РЕЖИМНОЇ НАДІЙНОСТІ

*І. І. Яремак**ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел.(0342) 72-71-72,**e-mail: yaremak_iryna@ukr.net*

За результатами досліджень синтезовано цільові функції задачі оптимізації усталених режимів роботи електроприводних насосних агрегатів нафтоперекачувальної станції за критеріями режимної надійності у залежності від витрати робочої рідини, що дало можливість дослідити вплив режиму на надійність електричної та гідравлічної підсистем насосного агрегата. Визначено екстремальні значення локальних цільових функцій режимної надійності електродвигуна та відцентрового насоса в різних (зокрема маловитратних) режимах роботи. Запропоновано оптимізацію усталених режимів роботи насосного агрегата здійснювати з одночасним використанням критеріїв надійності електроприводу та насоса. Встановлено, що максимальних значень показники надійності електродвигуна та відцентрового насоса досягають при різних значеннях витратного навантаження, що вимагає залучення методології багатокритеріальної оптимізації. Формалізовано задачу оптимізації усталених режимів електроприводного насосного агрегата нафтоперекачувальної станції в багатокритеріальній постановці з врахуванням технологічних обмежень роботи його підсистем. Проведено аналіз сучасних методів розв'язання задачі багатокритеріальної оптимізації усталених режимів роботи насосних агрегатів. Обґрунтовано метод вирішення задачі багатокритеріальної оптимізації, який в повній мірі враховує вплив режиму на надійність роботи підсистем насосного агрегата. З'ясовано, що найбільш доцільним методом розв'язку даної задачі є метод наближення до ідеальної (утопічної) точки в просторі критеріїв. Встановлене за допомогою даного методу співвідношення критеріїв в точці оптимуму є найкращим. Визначено значення «узгодженого оптимуму» витрати рідини з метою вибору оптимального за надійністю режиму роботи електроприводного насосного агрегата нафтоперекачувальної станції.

Ключові слова: електричний двигун; відцентровий насос; режимна надійність; багатокритеріальна оптимізація; цільова функція.

По результатам исследований синтезированы целевые функции задачи оптимизации установившихся режимов работы электроприводных насосных агрегатов нефтеперекачивающей станции по критериям режимной надежности в зависимости от расхода рабочей жидкости, что позволило исследовать влияние режима на надежность электрической и гидравлической подсистем насосного агрегата. Определены экстремальные значения локальных целевых функций режимной надежности электродвигателя и центробежного насоса в различных (в том числе малозатратных) режимах работы. Предложено оптимизацию установившихся режимов работы насосного агрегата осуществлять с одновременным использованием критериев надежности электропривода и насоса. Установлено, что максимальных значений показатели надежности электроприводного двигателя и центробежного насоса достигается при различных значениях расходной нагрузки, что требует привлечения методологии многокритериальной оптимизации. Формализовано задачу оптимизации установившихся режимов электроприводного насосного агрегата нефтеперекачивающей станции в многокритериальной постановке с учетом технологических ограничений работы его подсистем. Проведен анализ современных методов решения задачи многокритериальной оптимизации установившихся режимов работы насосных агрегатов. Обоснован метод решения задачи многокритериальной оптимизации, который в полной мере учитывает влияние режима работы на надежность подсистем насосного агрегата. Установлено, что наиболее целесообразным методом решения данной задачи является метод приближения к идеальной (утопической) точки в пространстве критериев. Установленное с помощью данного метода соотношение критериев в точке оптимума является наилучшим. Определено значение «согласованного оптимума» расхода жидкости с целью выбора оптимального по надежности режима работы электроприводного насосного агрегата нефтеперекачивающей станции.

Ключевые слова: электрический двигатель; центробежный насос; режимная надежность; многокритериальная оптимизация; целевая функция.

According to the research results, the target functions of the task of optimizing the functioning of the units according to the criteria of the regime reliability, depending on the flow of the working fluid were synthesized, which made it possible to research the influence of the regime on the reliability of operation of electric and hydraulic subsystems of the pump unit. The extreme weight of local target functions of regime reliability of electric motor and the centrifugal pump in various (especially low-flow rate) operating modes are determined. It is proposed to optimize the operating modes of pumping units of oil pumping station with the simultaneous use of the reliability criteria of electric drive and centrifugal pump. It was established that the maximum values of reliability of electric drive and centrifugal pump are achieved at different values of the load, which requires the involvement of multi-criteria optimization methods. The problem of optimization of the established modes of the pump unit in the multicriteria setting, taking into account the technological limitations of its subsystems was formalized. The analysis of modern methods of solving the problem of multicriteria optimization of the steady modes of operation of pump units is carried out. The method of solving the multicriterion optimization problem is substantiated, which fully takes into account the influence of operation mode on the reliability of electric and hydraulic subsystems of pumping unit. It is revealed that the most appropriate method for solving this problem is the method of approaching an ideal (utopian) point in the criteria space. With this method, the desired ratio of criteria at the optimum point is the best. The value of the "agreed optimum" of liquid flow has been determined in order to choose the optimum for the reliability of operation mode of the pumping unit of oil pumping station.

Keywords: electric motor; centrifugal pump; modes reliability; multicriteria optimization; target function.

Постановка проблеми. В Україні функціонує одна з найбільших в Європі система магістральних нафтопроводів. На сьогоднішній день її експлуатація характеризується неповним та несталим завантаженням. Насосні агрегати (НА) нафтоперекачувальних станцій (НПС) часто працюють зі значним недовантаженням, а їхні режими не є оптимальними, що спричинило різке зниження не лише енергоефективності, але й надійності їхньої роботи. Термін експлуатації магістральних нафтопроводів наблизився або перевищив проектний, що значно збільшує ймовірність аварій. Зменшення зносу насосних агрегатів та підвищення їхньої ефективності можна досягти шляхом вибору менш напружених, з точки зору роботи обладнання, режимів технологічного перекачування.

Тому задача оптимізації ustalених режимів роботи електроприводних НА НПС за критеріями режимної надійності є безумовно актуальною, а її успішне вирішення дасть змогу збільшити ресурс роботи НА НПС.

Аналіз досліджень і публікацій. Неоптимальний режим роботи НА зумовлює зниження ефективності та надійності приводного електродвигуна (ЕД) та відцентрового насоса (ВН). В [1] наведено порівняння енергоефективності магістральних НА при застосуванні регулювання шляхом дроселювання, байпасування та частотного регулювання для насосів. Проведений

критичний аналіз шляхів регулювання режимів роботи НА [1] доводить, що доцільність вибору одного наведених вище методів залежить від режимів перекачування, наявного обладнання та умов роботи НА НПС і потребує розв'язку задачі оптимізації режимів роботи ВН та ЕД не лише за критеріями ефективності, але і за критеріями надійності.

В літературі зазвичай відсутній єдиний досліджуваний показник надійності роботи НА. Зокрема в [2] під надійністю розуміють перелік властивостей об'єкта, а саме: безвідмовність, довговічність, збереженість, ремонтпридатність. Критеріями надійності систем є ймовірність безвідмовної роботи $P(t)$ протягом деякого часу t , середній час безвідмовної роботи системи T_c , інтенсивність відмови системи $\lambda(t)$ в момент t , густина розподілу часу до відмови $f(t)$ [2]. Проте ґрунтовний аналіз надійності роботи ВН та ЕД залежно від терміну їхньої експлуатації потребує довготривалого збору статистичної інформації (вибірок), який складно реалізувати на практиці. Для подолання даної ситуації авторами праць [3, 4, 5] запропоновано застосувати показники надійності об'єкту дослідження, які залежать не лише від тривалості експлуатації, але й від його режиму роботи. Дану надійність можна назвати

режимною, оскільки її інформативним, контрольованим показником є такий визначальний параметр режиму, як витрата робочої рідини. Робочий діапазон, тобто область режимів роботи, яка характеризується максимальною надійністю ВН, визначає його напірно-витратна характеристика [6].

Аналіз літературних джерел свідчить про недостатній обсяг проведених досліджень в контексті оптимізації роботи НА за критеріями режимної надійності. Тому необхідно дослідити вплив режиму нафтопререкачувальної станції на надійність роботи електричної та гідравлічної підсистем НА та визначити оптимальне значення витратного навантаження НПС.

Виділення невирішеної раніше частини спільної проблеми. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання: синтезувати цільові функції задачі оптимізації усталених режимів роботи НА НПС за критеріями режимної надійності у залежності від витрати робочої рідини; дослідити вплив режиму роботи на надійність електричної та гідравлічної підсистем НА; визначити оптимальні значення цільових функцій за критеріями надійності ЕД та ВН в недовантажених режимах; визначити значення «узгодженого оптимуму» витратного навантаження НА НПС та вибрати оптимальний за надійністю режим його роботи.

Задачі досліджень. Метою роботи є оптимізація усталених режимів електроприводного НА за критеріями режимної надійності його електричної та гідравлічної підсистем.

Матеріали дослідження. Надійність НА – це властивість виконувати задані функції протягом певного періоду часу зі збереженням у встановлених межах всіх параметрів. Дана властивість характеризується системою об'єктивних критеріїв технічного стану НА, які обумовлюють його робоздатність в різних режимах. Властивості надійності роботи ЕД та ВН характеризуються такими показниками: коефіцієнт технічного використання, середнє напрацювання на відмову, середній час відновлення, коефіцієнт оперативної готовності, середній ресурс до капітального ремонту, тощо. Однак на основі, наведеного вище, аналізу джерел та публікацій встановлено відсутність необхідної кількості статистичних вибірок про

вихід з ладу НА в різних режимах роботи, що не дозволяє визначити перелічені вище показники надійності ЕД та ВН. У зв'язку з цим запропоновано застосувати показники надійності НА, які залежать від його режиму роботи.

Як відомо НА містить електричну та гідравлічну підсистеми. Для визначення оптимального за критерієм надійності режиму роботи НА необхідно синтезувати цільові функції режимної надійності ЕД та ВН.

Цільову функцію режимної надійності ЕД φ_E представлено у вигляді коефіцієнта запасу його статичної стійкості [7].

$$\varphi_E = \frac{P_E^{\max}}{P} - 1, \quad (1)$$

де P – споживана з валу ЕД потужність насосу; P_E^{\max} – максимальне значення електромагнітної потужності ЕД [8].

З урахуванням рівнянь наведених в роботах [7] та [8] цільову функцію режимної надійності ЕД визначено за формулою (2)

$$\varphi_E = \frac{E_E^{\text{ном}}(\alpha_1 I_f^2 + \alpha_2 I_f + \alpha_3) U \eta_H}{\rho g Q H x_d} - 1, \quad (2)$$

де $E_E^{\text{ном}}$ – значення електрорушійної сили номінального режиму роботи; $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ – коефіцієнти апроксимації характеристики неробочого ходу ЕД; I_f – струм збудження обмотки ротора ЕД; U – напруга статора ЕД; η_H – ККД насоса; Q та H витрата та напір ВН відповідно; x_d – синхронний індуктивний опір ЕД.

Цільова функція режимної надійності ЕД представлена у системі відносних одиниць [6]. Базовими величинами прийнято потужність P_6^E (значення даної потужності дорівнює значенню базової потужності ВН P_6^H), напругу U_6 , струм I_6 та опір Z_6 [6]. Оскільки у режимі неробочого ходу $\varphi_E = \infty$, то для наочності показник нормалізовано (введено в діапазон зміни від 0 до 1) шляхом ділення на його максимальне значення $\varphi_{E0,1}$ при $Q = 0.1$.

Залежність цільової функції режимної надійності ЕД типу СТД-2500-2 від витратного навантаження насоса НМ-3600-230 зображено на рисунку 1.

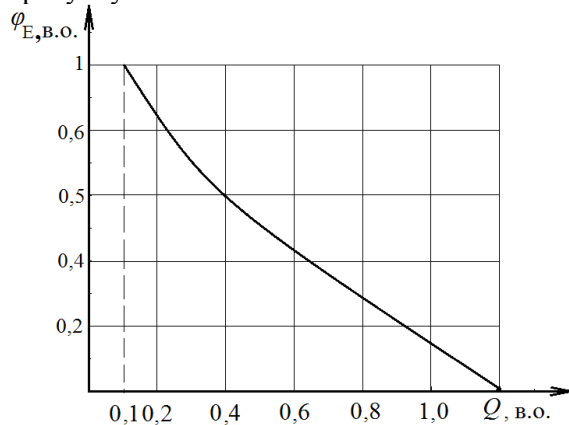


Рисунок 1 – Залежність цільової функції режимної надійності електродвигуна СТД - 2500-2 від витратного навантаження насоса НМ-3600-230.

Найбільш надійно ЕД працює при значенні витратного навантаження $Q=0,1$ (рис. 1). Максимальне значення цільової функції режимної надійності ЕД складає $\varphi_{E_{\max}(Q=0,1)} = 1$.

Робота ВН в неоптимальних режимах зумовлює значне зниження надійності насоса та спричиняє вихід з ладу підшипників, торцевих ущільнень, руйнування валів, підвищення рівня вібрації, тощо. В [9] надійність роботи ВН оцінено для трьох робочих зон: робота з мінімальною витратою (виникає при запуску насоса); режим недовантаження (при якому можлива кавітація та рециркуляція потоку на вході і виході робочого колеса); режим перевантаження (характеризується різким зростанням споживання енергії при зменшенні ККД та виникненням небезпеки втрати стійкості електроприводу).

Для кількісної оцінки надійності ВН застосовано показник надійності, що залежать від його режиму роботи [9], а цільову функцію режимної надійності ВН φ_H визначено за формулою (3) [9]

$$\varphi_H = \left(1 - \left(\frac{v}{v_{\max}} \right) \right) + C, \quad (3)$$

де v , v_{\max} – відповідно поточне та максимальне значення віброшвидкості; C – стала величина.

$$C = \frac{v_{\min}}{v_{\max}}, \quad (4)$$

де v_{\min} – мінімальне значення віброшвидкості;

$$v = c_0 + c_1 Q + c_2 Q^2 + c_3 Q^3, \quad (5)$$

де c_i – коефіцієнти апроксимації характеристики вібрації; Q – подача насоса.

Цільова функція режимної надійності ВН представлена у системі відносних одиниць. Базовими величинами прийнято напір H_6 , витрату Q_6 , потужність P_6^H та опір R_6 . H_6 та Q_6 вибрано з номінального режиму роботи ВН $H_6 = H^{\text{ном}}$, $Q_6 = Q^{\text{ном}}$, а P_6^H та R_6 визначено із відомих залежностей.

Графічне представлення цільової функції надійності ВН типу НМ-3600-230 залежно від витратного навантаження НА наведено на рисунку 2.

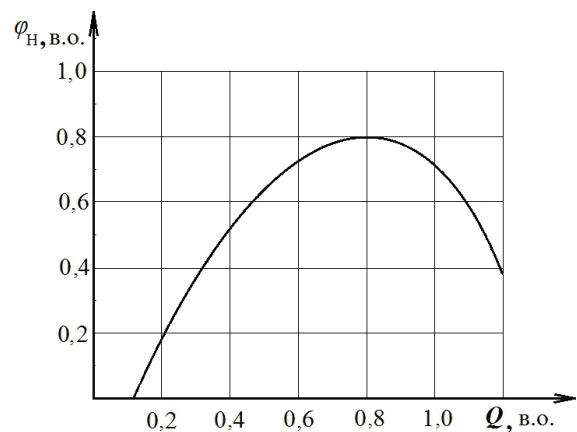


Рисунок 2 – Залежність цільової функції режимної надійності відцентрового насоса φ_H від витратного навантаження Q для насосу НМ-3600-230.

Найбільш надійно насос працює при значенні витратного навантаження $Q=0,8$ (рис. 2). Максимальне значення цільової функції режимної надійності ВН складає $\varphi_{H_{\max}(Q=0,8)} = 0,8$.

Шкала цільової функції режимної надійності ВН знаходиться в межах від 0 до 1. Значення, рівне одиниці вказує на оптимальний режим, який визначається мінімальними значеннями вібрації, температури підшипників та інших змінних, що пов'язані з терміном служби насоса. Проте встановлення даного режиму не означає нескінченне напрацювання на відмову. Зниження значення цільової функції пов'язане зі зменшенням надійності роботи насосу. Нульові значення цільових функцій φ_E

та φ_H безпосередньо не передбачають відмову НА, проте вказують на те, що таких умов експлуатації варто уникати [10].

Суміщені цільові функції режимної надійності ЕД та ВН представлено на рисунку 3.

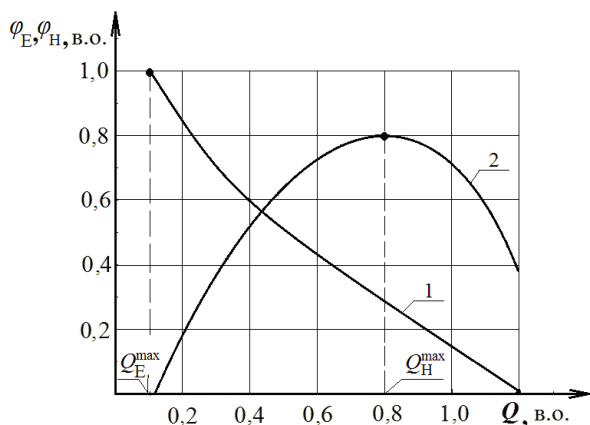


Рисунок 3 – Суміщені цільові функції режимної надійності ЕД та ВН у залежності від витратного навантаження агрегата Q:
 1 - φ_E цільова функція режимної надійності ЕД СТД-2500-2; 2 - φ_H цільова функція режимної надійності насоса НМ 3600-230.

Цільові функції режимної надійності ЕД та ВН мають суперечливий характер, а оптимальні значення витрати відрізняються від номінального, яке у відносних одиницях складає $Q=1$ (рис. 3).

Очевидно, що в процесі перекачування рідини необхідно досягати максимальних значень цільових функцій за критеріями режимної надійності ЕД та ВН. Однак, цього неможливо досягти одночасно, оскільки екстремальні значення цільових функцій за

критеріями надійності встановлюються при різних значеннях витратного навантаження Q (рис. 3). Для подолання вищенаведених протиріч оптимізаційну задачу представлено в багатокритеріальній постановці, а цільові функції апроксимовано поліномом третього степеня (6).

$$\left. \begin{aligned} \varphi_E(Q) &= a_0 + a_1Q + a_2Q^2 + a_3Q^3 \Rightarrow \max; \\ \varphi_H(Q) &= b_0 + b_1Q + b_2Q^2 + b_3Q^3 \Rightarrow \max; \\ Q &\in [Q_{\min} \dots Q_{\max}] \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

де Q_{\min}, Q_{\max} – відповідно мінімальне та максимальне значення витрати; $a_0, a_1, a_2, a_3, b_0, b_1, b_2, b_3$ – коефіцієнти апроксимації цільових функцій критеріїв надійності ЕД та ВН відповідно (табл. 1).

Таблиця 1 – Розрахункові значення коефіцієнтів апроксимації поліномів цільових функцій режимної надійності для насоса НМ-3600-230 з приводом від електродвигуна СТД-2500-2

Критерій режимної надійності	Значення коефіцієнтів апроксимації			
	ЕД, φ_E	a_0	a_1	a_2
	1,17823	-1,94227	1,5149	-0,5978
ВН, φ_H	b_0	b_1	b_2	b_3
	-0,2405	2,1940	-0,5473	-0,6997

Граничними умовами оптимізації є технологічні обмеження об'єкта дослідження за напором, подачею та ККД НА

$$\left. \begin{aligned} H_i &\leq H_{\max}; \\ H_i &\geq H_{\text{ПТ}}; \\ Q_i &\geq Q_{\min}; \\ Q_i &\leq Q_{\max}; \\ \eta_i &\geq \eta_{\text{зад}}; \\ K_{zi} &\geq K_{zi\text{min}}; \\ v &\leq v_{\max}, \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

де H_i, Q_i, η_i – відповідно напір, витрата та ККД i -го НА; H_{\max} – максимально допустиме значення тиску в нафтопроводі; $H_{\text{ПТ}}$ – напір на виході НА, при якому можливе утворення “перевальної” точки; Q_{\min} – найменше значення витрати

нафтопроводу, за якого можливе виконання планів транспортування нафти; $\eta_{\text{зад}}$ – заданий рівень ККД НА; $K_{\text{зі min}}$ – мінімальне значення коефіцієнту запасу статичної стійкості ЕД; v_{max} – максимальне значення віброшвидкості.

Існує безліч методів вирішення задачі багатокритеріальної оптимізації (БО). Їх умовно поділяють на групи [11]: методи, засновані на встановленні обмежень на критерії; методи, лінійного згортання критеріїв; методи пошуку компромісного розв'язку; методи інтерактивного розв'язку. Застосуємо перелічені методи для розв'язку задачі оптимізації роботи НА за критеріями режимної надійності і виберемо найбільш оптимальний.

Метод головного критерію полягає в тому, що в якості цільової функції обирається один із критеріїв, а інші вводяться як обмеження. В якості головного критерію обрано режимну надійність ВН. Згідно даного методу задачу БО представлено у вигляді (8)

$$\begin{cases} M_1(Q) = \varphi_H = \varphi_H(Q) \rightarrow \max; \\ \varphi_E = \varphi_E(Q) \geq \varphi_{E \min}; \\ Q \in [Q_{\min} \dots Q_{\max}] \end{cases} \quad (8)$$

де $\varphi_{E \min}$ – нижнє обмеження критерію.

Складність вибору головного критерію із множини критеріїв є основним недоліком даного методу, оскільки вони знаходяться у протиріччі.

Метод лінійного згортання полягає в скалярному об'єднанні цільових функцій критеріїв оптимізації з урахуванням вагових коефіцієнтів важливості

$$\begin{cases} M_2(Q) = \sum_{i=1}^m \lambda_{ij} \varphi_i(Q) \rightarrow \max; \\ Q \in [Q_{\min} \dots Q_{\max}] \end{cases} \quad (9)$$

де $\varphi_i(Q)$ – цільова функція i -го критерію режимної надійності НА; λ_{ij} – ваговий коефіцієнт важливості, що надається j -м

експертом i -й локальній цільовій функції; m – кількість цільових функцій.

Основним недоліком методу лінійного згортання є складність визначення числових значень вагових коефіцієнтів важливості. Також нерідко важко знайти необхідну кількість компетентних експертів для проведення кваліфікованої експертної оцінки.

Мінімаксні (максимінні) методи засновані на пошуку компромісного розв'язку. Для задачі оптимізації режимів роботи НА за критеріями надійності даний метод представлено у вигляді системи рівнянь

$$\begin{cases} M_3(Q) = \min_{i=1 \dots m} \varphi_i(Q) \rightarrow \max; \\ Q \in [Q_{\min} \dots Q_{\max}] \end{cases} \quad (10)$$

Недоліком методу є складність отримання в точці оптимуму бажаного співвідношення між критеріями.

Адаптивний метод заснований на використанні експертних оцінок. Експерту надається певна точка Q_i на парето-оптимальній множині розв'язків, і вказуються числові значення всіх критеріїв $\varphi_E(Q)$ та $\varphi_H(Q)$ в цій точці. Експерт вирішує, по якому з критеріїв виконувати максимізацію в конкретних умовах. В отриманій точці Q_{i+1} визначаються числові значення всіх критеріїв $\varphi_E(Q)$ та $\varphi_H(Q)$ і знову надаються експерту і так далі до тих пір, доки експерт не зупиниться на розв'язку Q_i^* , який він визнає оптимальним. Даний метод застосовується переважно для вирішення задач, які складно формалізувати. Зважаючи на те, що задачу оптимізації усталених режимів роботи НА НПС можна формалізувати, наприклад, у вигляді задачі БО, то застосування даного методу для визначення оптимального значення витрати НА є недоцільним.

Метод наближення до утопічної (ідеальної) точки [12] в просторі критеріїв дає можливість подолати невизначеність в

обґрунтуванні важливості критеріїв $\varphi_E(Q)$ та $\varphi_H(Q)$. Ідеальна точка - це точка $\varphi_i(Q) = (\varphi_H(Q), \varphi_E(Q))$, координатами якої є оптимальні значення цільових функцій φ_{Hmax} та φ_{Emax} . Згідно з рисунком 3 цільові функції надійності ЕД та ВН є в протиріччі, а зменшення значення φ_E відповідає збільшенню значення φ_H і навпаки. Максимальних значень цільові функції φ_H та φ_E досягають у випадку роботи ВН з витратним навантаженням, що складає у відносних одиницях $Q_{Hmax} = 0,8$ і $Q_{Emax} = 0,1$, відповідно. На рисунку 4 зображена графічна інтерпретація розв'язку.

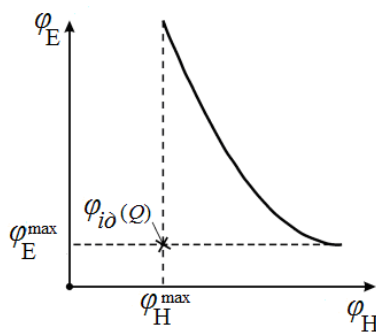


Рисунок 4 – Геометрична інтерпретація розв'язку.

Розв'язання задачі оптимізації цільових функцій режимної надійності ЕД та ВН методом наближення до ідеальної точки здійснюється у два етапи [11, 13]. Перший

$$\begin{cases} M_4(Q) = \sqrt{\frac{(\varphi_E(Q) - \varphi_{idE})^2}{\varepsilon_E} + \frac{(\varphi_H(Q) - \varphi_{idH})^2}{\varepsilon_H}} \rightarrow \min; \\ Q \in [Q_{min} \dots Q_{max}] \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} M_4^2(Q) = \frac{(\varphi_E(Q) - \varphi_{idE})^2}{\varepsilon_E} + \frac{(\varphi_H(Q) - \varphi_{idH})^2}{\varepsilon_H} \rightarrow \min \\ Q \in [Q_{min} \dots Q_{max}] \end{cases} \quad (14)$$

де ε_i – вагові коефіцієнти, що враховують відносну важливість кожного з критеріїв надійності.

етап полягає у визначенні координат ідеальної точки $\varphi_{id} = [\varphi_{Hmax}, \varphi_{Emax}]$ методом оптимізації локальних цільових функцій за критеріями надійності ЕД та ВН. Другий етап - це розв'язок задачі скалярної оптимізації відстані ρ від ідеальної точки до парето-оптимальної множини розв'язків.

$$\rho_{L^p} = \left(\sum_{i=1}^m |\varphi_i(Q) - \varphi_{idi}|^p \right)^{\frac{1}{p}}, \quad (11)$$

де ρ_{L^p} – відстань від ідеальної точки до парето-оптимальної множини розв'язків.

Розв'язок задачі БО можна знайти для різних значень p : для випадку $p=1$ визначають ρ_{L^1} (архімедова відстань), для $p=2$ визначають ρ_{L^2} (евклідова відстань), для $p \rightarrow \infty$ визначають ρ_C (чебишевська відстань).

При $p \rightarrow \infty$ рівняння (11) представлено у вигляді

$$\rho_C = \max_{i=1, \dots, m} \{|\varphi_i(Q) - \varphi_{idi}|\}. \quad (12)$$

Мінімізація евклідової відстані ρ_{L^2} (або квадрату відстані $\rho_{L^2}^2$) від ідеальної точки до множини парето-оптимальних розв'язків проведено за формулами

У випадку мінімізації евклідової відстані отримати бажане співвідношення критеріїв у точці оптимуму досить складно.

Для $p \rightarrow \infty$ (чебишевська відстань) (другий етап) набуває вигляду: знаходження розв'язку задачі БО (6)

$$\begin{cases} M_5(Q) = \max_{i=1,2,3,4} \left\{ \left| \frac{\varphi_E(Q) - \varphi_{идЕ}}{\varepsilon_E}, \frac{\varphi_H(Q) - \varphi_{идH}}{\varepsilon_H} \right| \right\} \rightarrow \min, \\ Q \in [Q_{\min} \dots Q_{\max}] \end{cases} \quad (15)$$

Мінімізація чебишевської відстані від ідеальної точки до парето-оптимальної множини розв'язків дає кращий результат для кожної з цільових функцій [13]. Мінімізація найбільшого з відхилень від ідеальної точки дає більш ефективний розв'язок, такий, при якому сума всіх

відносних втрат (під втратами слід розуміти віддалення від ідеальної точки) буде мінімальною.

Результати оптимізації усталених режимів роботи НА за критеріями режимної надійності наведено в таблиці 2.

Таблиця 2 – Результати розрахунків.

Назва методу	Оптимальн е значення Q	Значення цільової функції надійності ЕД φ_E	Значення цільової функції надійності ВН φ_H
Метод головного критерію	0,79	0,2	0,8
Метод лінійного згортання	0,7	0,32	0,79
Метод мінімізації евклідової відстані ідеальної точки	0,57	0,51	0,63
Метод мінімаксного наближення до ідеальної точки	0,73	0,43	0,75

Література

1. Бархатов А. Ф. Разработка методов энергоэффективной эксплуатации магистральных нефтепроводов на основе оптимизации технологических режимов : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 25.00.19. Москва, 2017. 28 с.
2. Рудаченко А. В., Байки С. С. Эксплуатационная надежность трубопроводных систем : учебное пособие. Томск : ТПУ, 2008. 117 с.
3. Erickson R. B., Sabini E. P. and Stavale A. E. Hydraulic Selection to Minimize the Unscheduled Maintenance Portion of Life Cycle Cost. *Pump Users International Forum 2000*. (10–12 October 2000). Karlsruhe, Germany, 2000.
4. Hodgson J., Walters T. Optimizing Pumping Systems to Reduce First or Life- Cycle Cost. *Proceedings of the 19th International Pump Users Symposium*, Houston, Texas, USA, February 25th–28th, 2002, p. 1-8.
5. Stavale A. E. Reducing reliability incidents and improving meantime between

- repair. *Proceedings of the 24th International Pump Users Symposium*, Houston, Texas, USA, 2008. P. 1–10.
6. Костишин В. С., Яремак І. І. Математична модель надійності та ефективності роботи насосного агрегата нафтоперекачувальної станції. *Науковий вісник Національного гірничого університету*. 2017. №5(161). С. 62–68.
7. Півняк Г. Г., Жежеленко І. В., Папаїка Ю. А., Несен Л. І. Перехідні процеси в системах електропостачання : підруч. 5-те вид., доопрац. та доп. Дніпро : НГУ, 2016. 600с.
8. Яремак І. І. Оптимізація квазіусталених режимів роботи нафтоперекачувальної станції. *Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації* : зб. матеріалів ІХ міжнар. наук.-техн. конф. молодих учених і спеціалістів, м. Кременчук , 7-8 квіт. 2011 р. Кременчук, 2011. С.240–241.
9. Костишин В. С., Яремак І. І. Аналіз показників ефективності та надійності роботи насосного агрегата на засадах системного

підходу. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2017. №1(62). С. 50–60.

10. Ahonen T. Monitoring of centrifugal pump operation by a frequency converter. *Doctoral Thesis. Lappeenranta University of Technology, Finland*. 2011. ISBN 978-952-265-075-7.

11. Mashunin Yu. K., Mashunin K. Yu. Modeling of technical systems on the basis of vector optimization (1. At equivalent criteria). *International Journal of Engineering Sciences & Research Technology*. 2014. №3(9). P. 84–96.

12. Зінзура В.В. Методи розв'язку задачі багатокритеріальної оптимізації регулювання напруги в електричних мережах. *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація* : зб. наук. праць Кіровоградського національного технічного університету, м. Кіровоград, 2012. Вип. 25, Ч. 1. С. 350–360.

13. Глущенко М. М. Методи розв'язку багатокритеріальної задачі оптимізації механізмів фінансової підтримки суб'єктів зовнішньоекономічної діяльності. *Інвестиційно-інноваційна діяльність, бюджетна і податкова політика*. 2015. №2(112). С.23–27.

References

1. Barhatov A. F. *Razrabotka metodov energoeffektivnoj ekspluatsii magistralnyh nefteprovodov na osnove optimizatsii tehnologicheskikh rezhimov* : avtoref. dis. ... kand. tehn. nauk : 25.00.19. Moskva, 2017. 28 s.

2. Rudachenko A. V., Bajki S. S. *Ekspluatsionnaya nadezhnost truboprovodnyh sistem* : uchebnoe posobie. Tomsk : TPU, 2008. 117 s.

3. Erickson R. B., Sabini E. P. and Stavale A. E. Hydraulic Selection to Minimize the Unscheduled Maintenance Portion of Life Cycle Cost. *Pump Users International Forum 2000*. (10–12 October 2000). Karlsruhe, Germany, 2000.

4. Hodgson J., Walters T. Optimizing Pumping Systems to Reduce First or Life-Cycle Cost. *Proceedings of the 19th International Pump Users Symposium*, Houston, Texas, USA, February 25th–28th, 2002, p. 1–8.

5. Stavale A. E. Reducing reliability incidents and improving meantime between repair. *Proceedings of the 24th International Pump*

Users Symposium, Houston, Texas, USA, 2008. P. 1–10.

6. Kostishin V. S., Yaremak I. I. Matematichna model nadijnosti ta efektyvnosti roboti nasosnogo agregata naftoperekachuvalnoyi stanciyi. *Naukovij visnik Nacionalnogo gornichogo universitetu*. 2017. №5(161). S. 62–68.

7. Pivnyak G. G., Zhezhelenko I. V., Papayika Yu. A., Nesen L. I. Perehidni procesi v sistemah elektropostachannya : pidruch. 5-te vid., dooprac. ta dop. Dnipro : NGU, 2016. 600s

8. Yaremak I. I. Optimizaciya kvaziustalenyh rezhimiv roboti naftoperekachuvalnoyi stanciyi. *Elektromehanichni ta energetichni sistemi, metodi modelyuvannya ta optimizaciyi* : zb. materialiv IH mizhnar. nauk.-tehn. konf. molodih uchenih i specialistiv, m. Kremenchuk, 7–8 kvit. 2011 r. Kremenchuk, 2011. S.240–241.

9. Kostishin V. S., Yaremak I. I. Analiz pokaznikov efektyvnosti ta nadijnosti roboti nasosnogo agregata na zasadah sistemnogo pidhodu. *Rozvidka ta rozrobka naftovih i gazovih rodovish*. 2017. №1(62). S. 50–60.

10. Ahonen T. Monitoring of centrifugal pump operation by a frequency converter. *Doctoral Thesis. Lappeenranta University of Technology, Finland*. 2011. ISBN 978-952-265-075-7.

11. Mashunin Yu. K., Mashunin K. Yu. Modeling of technical systems on the basis of vector optimization (1. At equivalent criteria). *International Journal of Engineering Sciences & Research Technology*. 2014. №3(9). P. 84–96.

12. Zinzura V.V. Metodi rozv'yazku zadachi bagatokriterialnoyi optimizaciyi regulyuvannya napруги v elektrichnih merezhah. *Tehnika v silskogospodarskomu virobniectvi, gалуzeve mashinobuduvannya, avtomatizaciya* : zb. nauk. prac Kirovogradskogo nacionalnogo tehničnogo universitetu, m. Kirovograd, 2012. Vip. 25, Ch. 1. S. 350–360.

13. Glushenko M. M. Metodi rozv'yazku bagatokriterialnoyi zadachi optimizaciyi mehanizmiv finansovoyi pidtrimki sub'yektiv zovnishnoekonomichnoyi diyalnosti. *Investicijno-innovacijna diyalnist, byudzhethna i podatкова politika*. 2015. №2(112). S.23–27.