БАГАТОЦІЛЬОВА ОПТИМІЗАЦІЯ УСТАЛЕНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ ЕЛЕКТРОПРИВОДНОЇ НАФТОПЕРЕКАЧУВАЛЬНОЇ СТАНЦІЇ

І. І. Яремак, В. С. Костишин

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, 76019, Україна. E-mail: yaremak_iryana@ukr.net

За допомогою системного підходу синтезовано за критеріями ефективності та надійності цільові функції багатоцільової задачі оптимізації режимів функціонування складного об'єкта керування - нафтоперекачувальної станції, у залежності від витрати робочої рідини її насосних агрегатів. Визначено вагові коефіцієнти важливості і кути «неузгодженості» локальних цільових функцій та відповідні екстремальні значення глобальної цільової функції в різних (зокрема маловитратних) режимах роботи. Для знаходження глобального оптимуму усталеного режиму роботи агрегатів залучено методи багатоцільової оптимізації. Встановлено поліоптимальне значення витратного навантаження електроприводного насосного агрегату та відповідної адитивної цільової функції за критеріями ефективності та надійності.

Ключові слова: електричний двигун, відцентровий насос, нафтоперекачувальна станція, багатоцільова оптимізація, автоматичне керування, критерії оптимальності.

МНОГОЦЕЛЕВАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ УСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДНОЙ НЕФТЕПЕРЕКАЧИВАЮЩЕЙ СТАНЦИИ

И. И. Яремак, В. С. Костишин

Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа
ул. Карпатская, 15, г. Ивано-Франковск, 76019, Украина. E-mail: yaremak_iryana@ukr.net

С помощью системного подхода синтезированы по критериям эффективности и надежности целевые функции многоцелевой задачи оптимизации режимов функционирования сложного объекта управления - нефтеперекачивающей станции, в зависимости от расхода рабочей жидкости ее насосных агрегатов. Определены весовые коэффициенты важности и углы «несогласованности» локальных целевых функций и соответствующие экстремальные значения глобальной целевой функции в различных (в том числе малорасходных) режимах работы. Для нахождения глобального оптимума установившегося режима работы агрегатов привлечены методы многоцелевой оптимизации. Установлено полиоптимальное значения расходной нагрузки электроприводного насосного агрегата и соответствующей аддитивной целевой функции по критериям эффективности и надежности.

Ключевые слова: электрический двигатель, центробежный насос, нефтеперекачивающая станция, многоцелевая оптимизация, автоматическое управление, критерии оптимальности.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Нафтоперекачувальна станція (НПС) магістральних нафтопроводів є складним об'єктом керування, в якому одночасно відбуваються технологічні процеси різної фізичної природи, якими треба керувати: електричні, магнітні, механічні, гідравлічні та теплові. Оптимальний режим роботи такого об'єкта характеризується комплексом критеріїв (ефективності, надійності, якості тощо), які зазвичай суперечливі, оскільки досягнення оптимальних рішень за будь-яким одним критерієм спричиняє погіршення інших. В цьому випадку визначення оптимального розв'язку можливе лише шляхом застосування евристичних процедур та системного підходу [1] із визначенням параметрів рішень на основі методології багатоцільової оптимізації (БО).

У більшості випадків на НПС магістральних нафтопроводів встановлено чотири електроприводні насосні агрегати (НА) – відцентрові насоси (ВН), які приводяться в рух синхронними або асинхронними електродвигунами (ЕД). Однак у зв'язку зі зменшенням обсягів перекачування зазвичай працює лише один НА. Тому особливо актуальним є вирішення задачі БО режимів роботи НА НПС, спрямованого на підвищення показників основних критеріїв, а саме надійності та ефективності їх роботи у недовантажених експлуатаційних режимах.

Аналіз досліджень і публікацій. Електричні, механічні і гідравлічні підсистеми НПС утворюють складний об'єкт керування, який потребує застосу-

вання системного підходу для комплексного аналізу його режимів роботи [2]. НПС притаманні ознаки складної технічної системи з ієрархічною структурою, яка має енергетичний взаємозв'язок між підсистемами різної фізичної природи та потребує узгодження їх сумісної роботи шляхом реалізації поліоптимального керування за множиною критеріальних цільових умов [3].

Відомо [4], що цільова функція – це аналітична залежність між критерієм (критеріями) оптимальності і параметрами, що підлягають оптимізації, зі вказівкою напрямку екстремуму. При дослідженні режимів роботи НПС, встановлено [5], що основними критеріями оптимальності є ефективність та надійність підсистем НА. Тут цільові функції відповідно для ВН та ЕД формалізовані у вигляді поліномів третього степеня за критеріями ефективності (φ_1, φ_2) та надійності (φ_3, φ_4) залежно від витратного навантаження агрегату Q .

$$\left. \begin{aligned} \varphi_1 &= a_1 Q^3 + a_2 Q^2 + a_3 Q + a_4 \Rightarrow \max; \\ \varphi_2 &= b_1 Q^3 + b_2 Q^2 + b_3 Q + b_4 \Rightarrow \max; \\ \varphi_3 &= c_1 Q^3 + c_2 Q^2 + c_3 Q + c_4 \Rightarrow \max; \\ \varphi_4 &= d_1 Q^3 + d_2 Q^2 + d_3 Q + d_4 \Rightarrow \max, \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

де φ_1, φ_2 - відповідно цільові функції за критеріями ефективності ВН та ЕД; φ_3, φ_4 - відповідно цільові

функції за критеріями режимної надійності ВН та ЕД; $a_1, a_2, a_3, a_4; b_1, b_2, b_3, b_4; c_1, c_2, c_3, c_4; d_1, d_2, d_3, d_4$ - коефіцієнти апроксимації характеристик ефективності та надійності ВН та ЕД.

Отримані в [5, 6, 7] результати доводять, що цільові функції (1) досягають максимуму при різних значеннях витрати нафти Q , що вимагає залучення методів БО для отримання компромісного рішення.

Метою роботи є БО усталених режимів електроприводної НПС на основі методології системного підходу за критеріями ефективності та надійності роботи її електричної та гідравлічної підсистем.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. Перекачування нафти магістральними нафтопроводами є складним технологічним процесом, в якому беруть участь електроприводні магістральні насоси НПС. У межах досліджуваної технологічної ділянки НПС зазвичай використовують послідовне сполучення чотирьох ВН (система перекачування із «насоса в насос»). Структурна схема НПС, яка поєднана зі схемою її електропостачання, наведена на рис. 1.

Рисунки 1 – Структурна схема технологічної ділянки НПС, суміщена зі схемою електропостачання

Для приводу магістральних насосів на НПС застосовують високовольтні синхронні та асинхронні ЕД потужністю до 8000 кВт. Режим роботи всіх ВН взаємопов'язані, тому взаємозалежними є також режими ЕД. Таким чином, при оптимізації технологічного процесу перекачування, ЕД та ВН технологічної ділянки слід розглядати як компоненти єдиного технологічного процесу, що утворюють структуру НПС.

Взаємозв'язки елементів системи НА відображені у функціональній схемі системи автоматичного керування (САК) НА (рис. 2). Очевидно, що перекачування нафти є сукупністю трьох взаємодіючих підсистем: електричної, механічної та гідравлічної. Режими їх роботи і вихідні параметри X_e, X_m, X_g залежать від керуючих впливів Y_e, Y_m, Y_g та різноманітних збурюючих факторів Z_e, Z_m, Z_g , які мають випадковий характер. Ця обставина веде до виникнення складних електрогідромеханічних процесів, які впливають на показники енергоефективності та надійності роботи НПС.

Рисунки 2 – Функціональна схема системи автоматичного керування насосного агрегату

Згідно з рис. 2 керуючими впливами електричної підсистеми є відповідно вхідні параметри режиму - значення напруги та струмів обмоток статора та ротора ЕД, які змінюються одночасно з вхідною частотою; механічної - значення швидкості обертання валу НА; гідравлічної - значеннями витрати та тиску на вході насоса. Перелічені параметри створюють вектор керувальних дій.

Збурюючі фактори, які характеризують якість електроенергії та фізичні властивості рідини (в'язкість та густина) - формують вектори збурень. Відповідно значення потужності на валу ЕД, тиску і витрати на виході з насоса та віброшвидкості підшипникових вузлів НА формують вектор вихідних параметрів режиму агрегату.

Для розв'язання поставленої задачі БО необхідна математична модель НА НПС, цільові функції і оптимізаційний алгоритм.

З метою адекватного відображення процесу перекачування нафти НА НПС та керування ним в [5] сформовано математичні моделі ВН та ЕД, які описують поведінку підсистем НПС в різних режимах роботи. Математичні моделі побудовані в системі відносних одиниць, яка дає змогу значно спростити дослідження роботи електричних та гідравлічних машин та встановити закономірності їх поведінки за різних умов роботи. Особливістю цієї системи є те, що вона дає змогу сформувати узагальнені залежності, зумовлені аналогією фізичних процесів у підсистемах НПС. Оскільки вибір критеріїв оптимізації та формування цільових функцій є однією з найважливіших проблем БО, то для їх визначення та формалізації застосуємо дані математичні моделі.

Технологічний режим роботи НПС є оптимальним, якщо він забезпечує екстремум (максимум чи мінімум) цільової функції при виконанні системи обмежень, які відображають умови протікання технологічного процесу перекачування і вимоги, що ставлять до нього. При цьому глобальна цільова функція записується у вигляді (2)

$$M = \Phi(\varphi_i(Q)) \Rightarrow \max, \quad (2)$$

де M - глобальна цільова функція; $\varphi_i(Q)$ - i -та локальна цільова функція за критеріями оптимальності залежно від витрати нафти Q .

При експлуатації ВН його технічний стан змінюється внаслідок зносу деталей та вузлів. Швидкість втрати роботоздатності ВН та його елементів визначається індивідуальними особливостями насоса, початковим станом та режимом його роботи. Це в свою чергу впливає на зміну віброшвидкості елементів конструкції ВН, яка є індикатором його надійності. Внаслідок зносу зростають всі види втрат, що спричиняє зниження ККД. Згідно [8] зниження ККД відносно базових значень говорить про необхідність ремонту НА. Таким чином критерії ефективності та надійності роботи НА є взаємозалежними. Графіки цільових функцій перелічених критеріїв від навантаження НПС для НА «СТД-2500-2 та НМ-3600-230» зображено на рис. 3 [5].

Рисунок 3 – Графіки локальних цільових функцій надійності та ефективності ЕД та ВН у залежності від витратного навантаження Q для НА типу «СТД-2500-2 та НМ-3600-230»

Результати отримані для НА типу «СТД-2500-2 та НМ-3600-230», коефіцієнти апроксимації характеристик ефективності та режимної надійності ВН та ЕД наведені у [5].

Як видно з рис. 3, оптимальні режими ЕД та ВН не співпадають, що вимагає прийняття компромісного рішення на основі методології БО.

При розв'язанні задач БО режимів функціонування НПС необхідно виконувати процедуру ранжування локальних цільових функцій за критеріями оптимальності, оскільки вони можуть мати різні розмірності. Тому всі локальні цільові функції зведено до однієї розмірності шляхом застосування системи відносних одиниць.

На основі аналізу існуючих методів БО [4] для задачі (2) застосуємо метод скалярного синтезу. Локальні цільові функції за критеріями оптимальності об'єднаємо в глобальну цільову функцію M , для згортки якої застосуємо адитивний підхід (3)

$$M = \sum_{i=1}^n \lambda_i \varphi_i(Q), \quad (3)$$

де $\lambda_i \geq 0$ – вагові коефіцієнти, які дають у кількісній шкалі перевагу i -го критерію оптимальності у порівнянні з іншим ($\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$), n – кількість цільових функцій.

Для вибраних нами чотирьох критеріїв оптимальності глобальну цільову функцію БО представимо у вигляді (4)

$$M = \lambda_1 \varphi_1 + \lambda_2 \varphi_2 + \lambda_3 \varphi_3 + \lambda_4 \varphi_4, \quad (4)$$

де $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ – вагові коефіцієнти важливості для критеріїв ефективності та надійності ВН та ЕД відповідно.

Графіки глобальних цільових функцій БО режимів роботи НА НПС при різних значеннях вагових коефіцієнтів важливості наведено на рис. 4.

Рисунок 4 – Глобальні цільові функції багатоцільової оптимізації режимів роботи НА НПС при різних значеннях вагових коефіцієнтів важливості

Зокрема у табл. 1 наведено 5 характерних варіантів, які уможливають визначення поліоптимального значення витратного навантаження M та максимального значення цільової функції $Q^{\max}$. Ці варіанти дають змогу окремо дослідити вплив цільових умов за критеріями ефективності (варіант 1) або надійності (варіант 1) НА, зробити визначальними об'єктами досліджень лише ВН (варіант 3) або ЕД (варіант 4), чи НА загалом (варіант 5) за умови рівнозначності обраних цільових умов.

Таблиця 1 – Результати розрахунку максимальних значень глобальних цільових функцій та відповідного витратного навантаження НА при різних значеннях вагових коефіцієнтів важливості

Варіанти	Значення вагових коефіцієнтів важливості					
	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	$M, \%$	$Q^{\max}, \text{ в. о.}$
1	0,5	0,5	0	0	92	1,0
2	0	0	0,5	0,5	64,4	0,88
3	0	0,5	0	0,5	96,05	0,1
4	0,5	0	0,5	0	93,4	0,89
5	0,25	0,25	0,25	0,25	77,8	0,88

Для знаходження поліоптимального значення адитивної цільової функції (3) необхідно правильно визначити величину вагових коефіцієнтів важливості локальних цільових функцій, що дає можливість дати числову оцінку вкладу відповідного критерію в кінцевий результат. Для цього використовують різні підходи, в рамках яких розроблено декілька методів [9]: метод Сааті або метод аналізу ієрархій (МАІ), метод ранжування критеріїв, метод Уея, метод Коггера і Ю, метод шкали Фішберна, принцип нечіткої більшості, метод найменших квадратів, тощо. Проте перелічені способи визначення вагових коефіцієнтів важливості при розв'язанні задач БО базуються на підходах попарного порівняння. Тому для визначення вагових коефіцієнтів важливості λ_i використаємо метод експертних оцінок шляхом залучення групи експертів чисельністю від 15 до 25 чоловік (спеціалістів енергетичного, електротехнічного, механічного відділів підприємств та науковців в даній галузі).

Для ранжування цільових функцій оптимальності роботи НА НПС було задіяно 16 компетентних у сфері транспортування нафти експертів, а саме головних інженерів, енергетиків, механіків системи магістральних нафтопроводів України. Ними проведено аналіз цільових функцій критеріїв оптимізації за 4-х бальною шкалою. Результати ранжування наведено в табл. 2.

Групова оцінка може вважатись достовірною тільки за умови узгодженості відповідей фахівців. Тому статистична обробка інформації, отримана від експертів, повинна включати в себе оцінку ступеня узгодженості думок експертів і виявляти причини їх неоднорідності. З цією метою в роботі використано коефіцієнт конкордації Кендала W - загальний коефіцієнт рангової кореляції для групи, що складається з m експертів, який вимірюється в діапазоні від 0 до 1. Групова оцінка, визначена згідно (5), вважається достовірною, коли $W \geq 0,7$ [10]

$$W = \frac{12S}{m^2(n^3 - n)}, \quad (5)$$

де n - кількість цільових функцій; S - сума квадратів відхилень, яка визначається згідно (6)

$$S = \sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=1}^m \lambda_{ij} - \lambda_{cp} \right)^2, \quad (6)$$

де λ_{ij} - ваговий коефіцієнт важливості, що надається j -м експертом i -й локальній цільовій функції; λ_{cp} - середнє значення вагових коефіцієнтів важливості (7)

$$\lambda_{cp} = \frac{1}{2} m(n+1). \quad (7)$$

Якщо будь-який експерт не може присвоїти цільовим функціям різні вагові коефіцієнти і присвоює їм однакові значення, то коефіцієнт конкордації W розраховують за формулою (8)

$$W = \frac{12S}{m^2(k^3 - k) - 12m \sum_{i=1}^m T_i}; \quad (8)$$

$$T_i = \frac{1}{12} \sum_{t_i} (t_i^3 - t_i). \quad (9)$$

де t_i - кількість однакових вагових коефіцієнтів важливості для i -ї цільової функції.

Відповідно до отриманих даних коефіцієнт конкордації для всієї сукупності критеріїв оптимальності ($n=4$) є достовірним, оскільки складає $W=0,75$, що свідчить про наявність узгодженості думок експертів.

Оскільки кількість цільових функцій критеріїв оптимальності роботи НА НПС $n < 7$, то для оцінки значимості отриманих результатів використаємо критерій Персона χ^2 (10) [11]

$$\chi^2 = m(n-1)W. \quad (10)$$

Таблиця 2 – Результати опитування експертів

Цільові функції за критеріями	Експерти															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
ефективності ВН, φ_1	4	3	4	3	4	3	3	3	3	4	3	4	4	3	4	3
ефективності ЕД, φ_2	3	3	2	4	2	3	4	3	3	3	3	2	3	4	3	4
надійності ВН, φ_3	2	2	2	2	3	2	1	2	2	2	2	3	1	2	2	1
надійності ЕД, φ_4	1	2	2	1	1	2	2	2	2	1	2	1	2	1	1	2

Розраховане та критичне (для одновідсоткового рівня значимості та ступеня свободи $f = n-1$) значення критерію Пірсона складають відповідно $\chi^2 = 36,04$ та $\chi_{кр}^2 = 11,34$. Оскільки $\chi^2 > \chi_{кр}^2$, то думки експертів узгоджені.

На рис. 5 наведено графічне представлення результатів ранжування, виконаного 16-ма експертами з метою встановлення «ваги» кожного критерію для визначення їх впливу на оптимальність режимів роботи НА НПС.

Рисунок 5 – Вагові коефіцієнти важливості цільових функцій оптимальності режиму НА

Результати аналізу показали, що у сукупності відібраних критеріїв найбільший вплив на величину глобальної цільової функції мають критерії ефективності (φ_1, φ_2) та менший вплив характерний для критеріїв надійності (φ_3, φ_4).

Другим способом візуалізації задачі БО є представлення цільових функцій $\vec{\varphi}_i(Q)$ у вигляді просторових векторів на координатних площинах, перетин яких формує вісь корисності l_k (рис. 6), що має зазвичай розмірність однієї з грошових одиниць або безрозмірна, а друга вісь l_{φ_i} має розмірність i -ї цільової функції.

Рисунок 6 – Візуалізація процесу скаляризації задачі векторної оптимізації

В загальному випадку кількість площин дорівнює кількості цільових функцій n , однак вона може бути меншою, якщо декілька цільових функцій мають однакову розмірність. У нашому випадку маємо дві площини, утворені віссю корисності l_k з осями $l_{\varphi_{1,2}}$ і $l_{\varphi_{3,4}}$ з розмірностями цільових функцій φ_1, φ_2 (критерії ефективності) та φ_3, φ_4 (критерії надійності).

Тоді глобальну цільову функцію M , для згортки якої застосований адитивний підхід, можна представити у вигляді вектора $\vec{M}$ на осі корисності l_k , модуль якого (11) рівний сумі проєкцій (модулів векторів N_i) всіх цільових функцій на цю вісь

$$M = \sum_{i=1}^n N_i = \sum_{i=1}^n \varphi_i \cos \gamma_i. \quad (11)$$

Очевидно, що вагові коефіцієнти λ_i - це косинуси кутів нахилу цільових функцій до осі корисності (12)

$$\lambda_i = \cos \gamma_i. \quad (12)$$

Ці кути, які змінюються в межах від нуля до 180 градусів, називатимемо кутами «неузгодженості» цільових функцій, оскільки вони візуально характеризують вклад кожної цільової функції в глобальну функцію корисності. Якщо кути гострі, то вагові коефіцієнти будуть додатні, зокрема для $\gamma_i = 0^\circ$ маємо $\lambda_i = 1$. Якщо $\gamma_i = 90^\circ$, то $\lambda_i = 0$ і цільова функція взагалі не впливає на результуюче рішення, в той

час як умова $\gamma_i > 90^\circ$ визначає такі суперечливі цільові функції, зростання яких веде до зменшення глобального оптимуму (від'ємне значення вагових коефіцієнтів $\lambda_i < 0$). Числові значення кутів «неузгодженості», отримані на основі результатів опитування 16-х експертів, наведені у табл. 3.

Таблиця 3 – Розрахункові значення кутів «неузгодженості»

Ваговий коефіцієнт λ , в.о.	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4
Кут «неузгодженості» γ , град	66,4	70,1	80,8	84,3

Сформована адитивна глобальна цільова функція дає можливість представити задачу БО у вигляді одноцільової задачі математичного програмування. Розв'язком її є поліоптимальне значення витрати Q^{opt} , яке забезпечує максимальну величину глобальної цільової функції M при дотриманні умов стійких режимів функціонування НПС. Даний розв'язок, не будучи оптимальним ні для одного з часткових критеріїв, має бути компромісним для глобальної цільової функції M . Така ситуація зумовлена наявністю суперечливості між переважною більшістю окремих локальних цільових функцій $\varphi_i(Q)$, оптимальності режимів роботи НПС, бо максимум для кожного з них досягається в різних точках.

Графік глобальної цільової функції оптимальності, побудований на основі визначених експертами вагових коефіцієнтів важливості, зображено на рис. 7.

Рисунок 7 – Глобальна цільова функція залежно від витратного навантаження НА

Традиційно для НА обирають таке витратне навантаження, яке відповідає номінальному режиму роботи ВН ($Q^{nom} = 1$). Як видно з рисунку, поліоптимальний режим роботи НПС, обладнаної НА «СТД2500-2 та НМ-3600-230», в малозавантажених режимах досягається при меншому значенні витрати, яке складає $Q^{opt} = 0,86$, для якого максимальне значення адитивної цільової функції за критеріями ефективності та надійності ВН та ЕД складає $M_{max}^{opt} = 72,17\%$.

Для розрахунку економічної ефективності роботи НА для визначеного поліоптимального значення витрати Q^{opt} необхідно цільову функцію M подати у вигляді функції корисності, яка має вартісну розмірність. Такий перехід має завжди суб'єктивний характер і вимагає додаткових досліджень, оскільки це потребує визначення ціни уступки за кожною цільовою функцією у грошовому еквіваленті. Особливо складно це зробити для цільових функцій за критерієм надійності, так як в літературі зазвичай відсутні експериментальні дані щодо таких досліджень.

ВИСНОВКИ.

1. Формалізовано глобальну цільову функцію багатокритеріальної задачі оптимального керування в маловитратних режимах за критеріями ефективності та надійності роботи НА НПС.

2. На основі опитування експертів встановлено вагові коефіцієнти важливості цільових функцій та визначено їх вплив на оптимальність малозавантажених режимів роботи НА НПС.

3. З використанням апарату багатоцільової оптимізації проведено згортання глобальної цільової функції адитивним методом та визначено поліоптимальне значення витрати рідини при недовантажених режимах роботи НПС $Q^{opt} = 0,86$, яке відрізняється від номінальної витрати ВН $Q^{nom} = 1$.

4. Візуалізацію процесу скаляризації задачі векторної оптимізації режимів роботи НА здійснено за допомогою розгляду кутів «неузгодженості» просторових векторів цільових умов.

5. Розрахунок економічної ефективності роботи НА НПС для визначеного поліоптимального значення витрати рідини вимагає проведення додаткових довготривалих експериментальних досліджень на діючих станціях магістральних нафтопроводів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Ларичев О.И. Вербальный анализ решений / под ред. А. Б. Петровского. Москва: Наука, 2006. 181 с.
2. Гусев Ю.М., Гафаров Р.Р., Данилин О.Е. Оптимизация работы участка магистрального нефтепровода на основе генетического алгоритма. *Вестник*

Уфимского государственного авиационного технического университета. 2008. Т. 11, № 1 (28). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=11751442>.

3. Ладанюк А.П. Системна задача управління технологічними комплексами. *Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем управління організаційно-технічними комплексами*: матеріали Міжнар. наук-техн. конф., 26–27 листопада 2009 р. Київ: НУХТ, 2009. С. 12–13.

4. Rangaiah, G.P. (ed) (2009), Multi-Objective Optimization: Techniques and Applications in Chemical Engineering, World Scientific, Singapore.

5. 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.

6. Костишин В.С., Сорохтей І.І. Оптимізація режимів роботи нафтоперекачувальних станцій за критерієм мінімального електроспоживання. *Вісник Кременчуцького державного університету імені Михайла Остроградського*. 2010. Вип. 3/2010 (62) частина 1. С. 15–17.

7. Яремак І.І., Костишин В.С., Костишин А.В. Розрахунок показників енергоефективності режимів роботи нафтоперекачувальної станції, обладнаної відцентровими насосами зі синхронним електроприводом. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2017. т. 27, № 3. С. 166–170.

8. Гумеров А.Г., Гумеров Р.С., Акбердин А.М. Эксплуатация оборудования нефтеперекачивающих станций / Москва: Недра-Бизнесцентр, 2001. 475с.

9. Медиковський М.О., Шуневич О.Б. Дослідження ефективності методів визначення вагових коефіцієнтів важливості. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2011. № 5. С. 176–182.

10. Тарасов В.А., Герасимов Б.М., Левин И.А., Корнейчук В.А. Интеллектуальные системы поддержки принятия решений: теория, синтез, эффективность. Киев: МАКНС, 2007. 336 с.

11. Суліма І.М., Яковенко В.М. Вища математика. Теорія ймовірностей. Математична статистика. Київ: НАУ, 2004. 238 с.

MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION OF STEADY OPERATING MODES OF ELECTRIC OIL PUMPING STATION

I. Yaremak, V. Kostyshyn

Ivano-Frankivsk National Technical University Oil and Gas

vul. Karpatska, 15, Ivano-Frankivsk, 76019, Ukraine. E-mail: yaremak_iryana@ukr.net

Purpose. To research multi-objective optimization of steady operating modes of electric oil pumping station basing on system approach by criteria of efficiency and reliability of electric and hydraulic subsystems. **Methodology.** According to the criteria of efficiency and reliability were synthesized target function of the multi-objective task of optimization of operating modes of a complex control object such as oil pumping station (OPS) depending on the flow rate of working fluid of its pumping units (PU). It gave the opportunity to research operating modes of electric PU in underload conditions. **Results.** By using system approach, global target function of multi-objective task of optimal control in steady operating modes of PU of OPS has been formalized. Basing on expert polls weight coefficients of significance of target functions and their impact on optimality of low-duty operating modes of electric PU have been determined. It was found that polioptimal values of flow rate in underload operating modes differ from nominal flow rate of centrifugal pump. **Originality.** For the first time on the basis of system approach global target function of multi-objective optimization of operating modes of PU of OPS was synthesized by the criteria of efficiency and reliability of electric motor and centrifugal pump. Visualization of the scalarization process of the problem of vector optimization of operating modes of PU is accomplished by considering the angles of "inconsistency" of spatial vector of target conditions. The polyoptimal value of flow rate duty of electric PU and corresponding additive target function have been determined by criteria of

efficiency and reliability of the electric and hydraulic subsystems of PU. **Practical value.** Multi-objective optimization of operating modes of electric OPS gives opportunity to determine the polyoptimal operating mode of PU of OPS by criteria of efficiency and reliability of work without conducting expensive field experiments.

Key words: electric motor, centrifugal pump, oil pumping station, multi-objective optimization, automatic control, optimality criteria.

REFERENCES

1. Larichev, O.I. (2006), *Verbalnyy analiz reshenij* [Verbal analysis of decisions], Nauka, Moscow, Russia.
2. Gusev, U.M., Gafarov, R.R., Danilin, O.E. (2008), "Optimization to work of petropumping stations on a site of the main pipeline", *Bulletin of Ufa State Aviation Technical University*, vol.11, no. 1(28), available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=11751442> (accessed February 20, 2018).
3. Ladaniuk, A.P. (2009), "System task of control of technological complexes", *Suchasni metody, informatsiine, prohramne ta tekhnichne zabezpechennia system upravlinnia orhanizatsiino – tekhnichnymi kompleksamy. Mizhnarodna naukovu-tekhnichna konerentsia* [Modern methods, information, software and technical support of control systems for organizational and technical complexes. International scientific and technical conference], Kyiv, National University of Food Technologies, November 26-27, 2009, pp. 12-13.
4. Rangaiah, G.P. (ed) (2009), *Multi-Objective Optimization: Techniques and Applications in Chemical Engineering*, World Scientific, Singapore.
5. Kostyshyn, V.S., Yaremak, I.I. (2017), "Mathematical model of reliability and efficiency of pumping unit of an oil", *Scientific bulletin of National Mining University*, no. 5 (161), pp. 62–68.
6. Kostyshyn, V.S., Sorokhitei, I.I. (2010), "Optimization of the working processes of oil pump stations on criterion of the minimum electro-consumption", *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*, vol. 3, no. 62, pp. 15-17.
7. Yaremak I.I., Kostyshyn, V.S., Kostyshyn, A.V. (2017), "The calculation of energy efficiency parameters of modes of oil pumping station equipped with centrifugal pumps driven by the synchronous electric motors", *Scientific Bulletin of Ukrainian National Forestry University*, vol. 27, no 3, pp. 166-170.
8. Gymerov, A.G., Gymerov, R.S., Akberdin, A.M. (2001), *Eksplyataciya oborudovaniya nefteperekachivaushih stancii* [Operation of oil pumping station equipment], Nedra-Biznescentr, Moscow, Russia.
9. Medykovskyi, M.O., Shunevych, O.B. (2011), "Investigation of the effectiveness of methods for determining weighting factors of importance", *Herald of Khmelnytskyi national university*, no 5, pp. 176-182.
10. Tarasov, V.A., Gerasimov, B.M., Levin, I.A., Kornejchuk, V.A. (2007), *Intellectualnye sistemy podderzhki prinyatiya reshenij: Teoriya, sintez, effektivnost* [Intellectual decision support systems: Theory, synthesis, efficiency], MAKNS, Kyiv, Ukraine.
11. Sulima, I.M., Yakovenko, V.M. (2004), *Vyshcha matematyka. Teoriia ymovirnostei. Matematychna statystyka* [Higher mathematics. Probability theory. Mathematical statistics], National Agrarian University, Kyiv, Ukraine.

Стаття надійшла 22.01.2018.