

ПРИНЦИПИ РАЦІОНАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ НЕУСТАЛЕНИМИ РЕЖИМАМИ В СКЛАДНИХ ГАЗОТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМАХ

¹В. Я. Грудз *, ¹Я. В. Грудз, ²Р. В. Терещенко, ¹О. Т. Чернова, ¹Р. Б. Стасюк

¹ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15,
e-mail: srgg429@gmail.com

²Виробниче ремонтно-технічне підприємство «Укргазенергосервіс»;
08150, м. Боярка, вул. Маяковського, 49, e-mail: terescenko-rv@utg.ua

Розглядається задача вибору раціонального керування нестационарними процесами в складних газотранспортних системах, викликаними нестабільністю завантаження в умовах обмеженого обсягу транзиту газу. Керуючі впливи в таких умовах повинні забезпечити переведення об'єкта з однієї точки функціонального фазового простору в іншу, підтримання його заданого стану при різних збурюючих впливах при одночасному виконанні умови мінімуму сумарних витрат. Наводяться результати аналітичних досліджень характеру протікання і тривалості нестационарних процесів в складних газотранспортних системах, викликаних виключенням з режиму роботи окремих компресорних станцій. Побудовано математичну модель газопроводу з врахуванням впливу компресорних стацій на основі класичних рівнянь енергії газового потоку і нерозривності з використанням функцій джерела Дірака. Реалізація створеної математичної моделі шляхом застосування інтегральних перетворень Фур'є і Лапласа дозволила отримати в аналітичній формі залежність, що відображає закон коливання в часі масової витрати газу в початковому і кінцевому перерізі газопроводу. Побудовані залежності тренду продуктивності газотранспортної системи на її початку і в кінці показали вплив розміщення компресорної станції в газотранспортній системі, зокрема її порядкового номеру на трасі номеру, на характер нестационарного процесу, викликаного її зупинкою, зокрема на тривалість нестационарності. Ці задачі є основними завданнями оптимального керування транспортом газу по магістральних газопроводах, що дозволяє вирішити проблему безперебійного забезпечення споживачів газу. Для задач оптимального керування запропоновано алгоритм методу крокових варіацій, згідно з яким варіації входного тиску і витрати локалізуються, тобто приймаються постійними на даному кроці, а зміна функції керування в основному впливає тільки на вихідний тиск. Отримані результати і підсумкові висновки будуть корисними при прогнозуванні режимів роботи газотранспортних систем, особливо за умови їх неповного завантаження.

Ключові слова: газотранспортна система, компресорна станція, відключення, нестационарний процес, керування, тривалість.

Рассматривается задача выбора оптимального управления нестационарными действиями в сложных газотранспортных системах, вызванными нестабильностью загрузки в условиях ограниченного размера транзита газа. Управляющие воздействия в таких условиях должны обеспечить перевод объекта из одной точки функционального фазового пространства в другую, поддержание его заданного состояния при различных возмущающих воздействиях при одновременном выполнении условия минимума суммарных затрат. Приводятся результаты аналитических исследований характера протекания и длительности нестационарных действий в сложных газотранспортных системах, вызванных отключением из режима работы отдельных компрессорных станций. Построена математическая модель газопровода с учетом влияния компрессорных станций на основе классических уравнений энергии газового потока и неразрывности с использованием функций источника Дирака. Реализация созданной математической модели путем применения интегральных преобразований Фурье и Лапласа позволила получить в аналитической форме зависимость, отражающую закон колебания во времени массового расхода газа в начальном и конечном сечении газопровода. Построенные зависимости тренда производительности газотранспортной системы в ее начале и конце показали влияние места размещения компрессорной станции в газотранспортной системе, в частности ее порядкового номера на трассе номера, на характер нестационарного процесса, вызванного ее остановкой, в частности на длительность нестационарности. Эти задачи являются основными задачами оперативного оптимального управления транспортом газа по магистральным газопроводам, позволяющим решить проблему бесперебойного обеспечения потребителей газа. Для задач оптимального управления предложен алгоритм метода шаговых вариаций, согласно которому вариации входного давления и расхода локализуются, т.е. принимаются постоянными на данном шаге, а изменение функции управления в основном

влияет только на исходное давление. Полученные результаты и итоговые выводы будут полезны при прогнозировании газотранспортных режимов работы систем, особенно при их неполной загрузке.

Ключевые слова: газотранспортная система, компрессорная станция, отключение, нестационарный процесс, управление, продолжительность.

The problem of choosing the rational control of non-stationary processes in complex gas transmission systems caused by instability of loading in the conditions of limited volume of gas transit is considered. Control effects in such conditions must ensure the transfer of the object from one point of the functional phase space to another, maintaining its specified state under different perturbing effects while fulfilling the condition of minimum total costs. The results of analytical studies of the nature of the flow and duration of non-stationary processes in complex gas transmission systems caused by the exclusion from the mode of operation of individual compressor stations are presented. A mathematical model of the gas pipeline is constructed taking into account the influence of compressor stations on the basis of classical equations of gas flow energy and continuity using the functions of the Dirac source. The implementation of the created mathematical model by applying the integral Fourier and Laplace transforms allowed to obtain in analytical form the dependence that reflects the law of fluctuations in time of mass flow of gas in the initial and final cross section of the pipeline. The constructed dependences of the gas transmission system productivity trend at its beginning and end showed the influence of compressor station placement in the gas transmission system, in particular its serial number on the route number, on the nature of the nonstationary process caused by its shutdown, in particular on the nonstationarity duration. These tasks are the main tasks of operational optimal management of gas transport through main gas pipelines, which allows to solve the problem of uninterrupted supply of gas consumers. For optimal control problems, an algorithm of the method of step variations is proposed, according to which variations of inlet pressure and flow are localized, ie taken as constants at this step, and change of control function mainly affects only outlet pressure. systems, especially if they are not fully loaded.

Keywords: gas transmission system, compressor station, shutdown, non-stationary process, control, duration.

Вступ

Газотранспортна система, як правило, складається з компресорних станцій зі складною взаємопов'язаною структурою, місця приєднання компресорних машин, систем автоматики, телемеханіки, лінійних ділянок, підземних сховищ, газорозподільних станцій.

На роботу газопроводу найбільше впливають значні зміни газоспоживання, збурення, викликані аварійними ситуаціями, зміни пропускної здатності системи і т.д. Все це обумовлює нестационарні режими транспорту газу, врахування яких в диспетчерсько-оперативному керуванні і є актуальною проблемою.

Огляд літературних джерел

Як відомо [1,2], нестационарний рух газу трубами описується нелінійними диференціальними рівняннями в часткових похідних, тобто спостерігається розподіленість параметрів об'єктів керування. Отже, проблема керування при нестационарних умовах передачі газу стає складною. Якщо в задачах керування об'єктом із зосередженими параметрами стану описується системою звичайних диференціальних рівнянь за часом, а керуючі впливи прямо пов'язані з параметрами стану, то тут має місце розподіленість параметрів стану і самих керуючих впливів, які не тільки впливають за часом, але і по просторовій координаті. Вектори керування, компоненти яких є функціями регулюючих органів компресорних станцій (КС) і газоперекачувальних агрегатів (ГПА), кількості машин на

КС, схем підключення агрегатів, розташовані у відповідних точках просторової координати.

Таким чином, магістральний газопровід є об'єктом багатозв'язкового регулювання з розподіленими параметрами і неповною інформацією. Неповнота інформації пов'язана з тим, що на даний об'єкт діють впливи стохастичного характеру. Це температурні коливання, що залежать від кліматичних умов і впливають на пропускну здатність безпосередньо і через скупчення гідратів, коливання відборів транзитних та основних споживачів, витоку тощо.

Мета роботи

За своїм характером керуючі впливи на магістральних газопроводах можна віднести до кусково-неперервного класу, тобто вони неперервні для всіх розглянутих моментів часу, крім кінцевого числа моментів, де вектор-функція $\bar{u}(t)$ може мати розриви першого роду (маються на увазі перемикування агрегатів на КС).

Однак, вирішення завдань керування, як правило, вимагає дискретного представлення всіх керуючих впливів. Крім того, для газопроводів доцільно розглядати метод визначення законів керування у функції часу. Основні завдання оптимального керування газотранспортними системами будуть сформовані в задачах досліджень.

Задачі досліджень

Задача 1. Перехід об'єкта з однієї точки функціонального фазового простору в іншу, наперед задану точку. Іншими словами, це - завдання зміни станів з урахуванням усталеного руху газу при відповідній сукупності граничних умов [4]. Цю задачу можна сформулювати наступним чином. Нехай тиски на виході компресорних станцій задані у вигляді вектора $\bar{P}^*(0,t) \in R$. Необхідно знайти вектор керування $\bar{u}(t) \in [\bar{u}, \hat{\bar{u}}]$ ($\bar{u}, \hat{\bar{u}}$ - нижня і верхня множини граничних обмежень) в часі $t \in [t_0, T]$ такий, щоб в кінці процесу $t=T$, інтегральне відхилення вектора $\bar{P}(0,t) \in R$ від бажаного $\bar{P}^*(0,t)$ було мінімальним, тобто, щоб векторний функціонал який є мірою відхилення, набував найменшого значення.

$$I = \sum_{k=1}^n \int_{t_0}^T [\bar{P}_k^*(0,t) - \bar{P}(0,t)]^2 dt. \quad (1)$$

Можна сформулювати й інші завдання, які є модифікаціями даної задачі. Це так звані завдання з фіксованою кінцевою n -мірною областю та нефіксованим часом t та інші.

Актуальним завданням максимальної швидкодії є процес переведення об'єкта з одного стану в інший за мінімальний час, тобто

$$T_{msn} = T - t_0. \quad (2)$$

Задача 2. Підтримання заданого $\bar{P}(0,t)$ стану при різних збурюючих впливах. Нехай задано певний вектор стану $\bar{P}^* = \bar{P}^*(0,t)$. Необхідно знайти $\bar{u}(t) \in [\bar{u}, \hat{\bar{u}}]$ такий, щоб був забезпечений мінімум оцінки у вигляді максимального відхилення від заданого розподілу за час $T - t_0$,

$$I_{\max} = \max_{[t_0, T]} |\bar{P}^*(0,t) - \bar{P}(0,t)|, \quad (3)$$

тобто для наближеного рішення.

$$I_{\max} = \max_{[t_0, T]} |\bar{P}^*(0,t) - \bar{P}(0,t)| < \varepsilon, \quad (4)$$

де ε – мале додатне число.

Задача 3. Перехід об'єкта в заданий стан, або підтримання фіксованого стану при одночасному виконанні умови мінімуму сумарних витрат. Це означає, що треба знайти вектор-функцію $\bar{u}(t) \in [\bar{u}, \hat{\bar{u}}]$, яка переводить об'єкт із заданого стану в інший $\bar{P}(0,t)$ або підтримує заданий стан таким, щоб за час $T - t_0$, крім ви-

конання умов мінімуму відхилення (1) або (3), забезпечувався мінімум функціоналу

$$\Phi = \sum_{k=1}^N \int_{t_0}^T N_k(P_k(0,t)) dt, \quad (5)$$

де $N_k(P_k(0,t))$ - узагальнена функція витрат k -тій компресорної станції.

Ці задачі виражають основні принципи оперативного оптимального керування транспортування газу магістральними газопроводами, що дає змогу вирішити проблему безперервного забезпечення споживачів газу.

Задача 1 вирішується при більш різких змінах споживання, при міжсезонних переходах, при введенні потужностей на стадії проектування. Більш важливим в оперативному управлінні є задача 2. Це задача полягає у компенсації збурень від зміни параметрів постачання транзитного газу в умовах неповного завантаження газотранспортної системи. Тут же виникає дуже важлива задача прогнозування графіків споживання, обумовлена успішним вирішенням задачі 2.

З точки зору економії енергетичних ресурсів, особливо важливу роль відіграє задача 3. При вирішенні задач 1 і 2 досягається головна мета, але при цьому встановлені потужності компримування газу трасою можуть розподілятися нерационально, при цьому отримуємо неповний ефект. Задача 3 виражає основну мету оперативного керування.

Висвітлення основного матеріалу

У розглянутих задачах досить складно визначити мінімум. Для критерію (1) використовують критерій квадратичного відхилення. Даний критерій забезпечує досить плавний, без різких коливань перехідний процес. Критерій (3) в задачі 2, для систем з строго розподіленими параметрами ($I=0$), виконати часом неможливо. За критерієм (3) необхідно знайти таку точку фазової траєкторії, яка збіглася б із заданою. Отже, більш коректною постановкою задачі є постановка з вимогою виконання критерію (4).

Для задачі 3 потрібне врахування одночасно двох критеріїв. У загальному випадку для двох строго витриманих критеріїв рішення задачі не існує. Тому в розумінні строгого критерію приймають один з них, а інший розглядають як додаткову умову. Отже, критерії (1) і (4) розглядають як додаткові умови, що накладаються на деякі відхилення. Ці відхилення, отримані в процентному відношенні, не повинні відрізнятися від своїх екстремумів більш ніж на точність ε_1 і ε_2 відповідно.

Розглянемо рішення задачі оптимізації режимів газопроводу при нестационарних умовах типу задачі 3, тобто переходу газопроводу з початкового стану в будь-який інший заданий. При цьому потрібно забезпечити мінімум середньоквадратичного відхилення реальних параметрів режимів від заданих і мінімум затрат на перекачування. Таке завдання, більш характерне для випадків розрахунку режимів при виведенні об'єктів магістрального транспорту газу на проєктну потужність або з аварійних ситуацій, може бути використане для стабілізації оперативних режимів у довкіллі оптимального (за мінімум витрат) стаціонарного стану. У цьому випадку задають впливи іншого стану, в які об'єкт повинен перейти. Мета рішення - повернути об'єкт у вихідне положення протягом заданого часу при мінімальних витратах на керування. Для математичного опису ділянок газопроводів з достатньою точністю прийняті лінеаризовані рівняння руху газу. Щодо компресорних станцій, для задачі стабілізації режимів (при незначних змінах параметрів) можна обмежитися квадратичними або лінійними залежностями при апроксимації напірної характеристики компресорних агрегатів.

Сформулюємо задачу 3 для випадків лінеаризованих рівнянь руху газу. Функція розподілу тиску $P(x,t)$ повинна задовольнити вихідній системі рівнянь, в яку входять рівняння руху (з урахуванням підвищення тиску на кожній з КС) і нерозривності

$$\frac{\partial P}{\partial x} + \sum_{j=1}^N \Delta P_{KCi} \delta(x - x_i) + \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\lambda w_c}{2d} (\rho w) = 0;$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial x} = 0;$$

де ΔP_{KCi} – підвищення тиску на i -тій КС з лінійною координатою x_i ;

$\delta(x - x_i)$ – функція джерела Дірака;

ρw – масова швидкість газу;

λ – коефіцієнт гідравлічного опору.

Початкові і граничні умови матимуть вигляд:

$$P(x,0) = P(x);$$

$$-\frac{\partial P}{\partial x} - P(x,t)|_{x=L} = q(t); P(x,t)|_{x=0} = P_0(t) \quad (6)$$

з додатковою умовою на КС, яка відображає характер основних впливів

$$P_N(0,t) = au^2(t) + b, \quad (7)$$

де $q(t)$ – масова витрата газу в кінці системи як функція часу;

$P_0(t)$ – початковий тиск як функція часу.

Коефіцієнти a і b у формулі (7) визначені при середніх значеннях тиску і витрати в часі. Таке припущення справедливе для впливу, що змінюється плавно. Це можливо для плавно змінюваного впливу, наприклад, для регулювання зміною швидкості обертання роторів ГПА.

Функціонал задачі 3 представлений таким чином:

$$I = \int_0^T [P^*(0,t) - P(0,t)]^2 dt + \alpha k_1 \int_0^T u(L,t)[u(L,t) - k_2] dt. \quad (8)$$

Другий підінтегральний вираз отримано на основі апроксимації миттєвої потужності згідно з [3, 5].

Завдання оптимізації полягає в наступному: необхідно знайти таку керуючу функцію $u(t)$, яка за час T забезпечить мінімум функціоналу (8), а знайдене $P(x,t)$ задовольняє умовам (6), (7) і рівнянням руху газу та нерозривності.

Таким чином, рішення задачі 3 з критерієм (8) обумовлюється переходом газопроводу з одного стану в інший за час T при мінімальному відхиленні від заданого стану і найменшою використаною потужністю, тобто отримується компромісне рішення.

Для умов (6) та (8) у разі квадратичної функції керування, легко доводиться єдиність оптимального розв'язку.

Підінтегральна функція другого інтеграла (8) після нескладних перетворень набуває квадратичного вигляду.

Другий інтеграл можна записати у вигляді:

$$\alpha k_1 \int_0^T \left(v(t) + \frac{k_2}{2k_1} \right) \left(v(t) - \frac{k_2}{2k_1} \right) dt = k_1 \int_0^T v^2(t) dt + c,$$

$$\text{ввівши позначення } u(t) - \frac{k_2}{2k_1} = v(t); c = \frac{\alpha k_2}{4k_1} T;$$

α – коефіцієнт розмірності.

Єдиність оптимального рішення багато в чому визначає застосування методу варіацій.

Як показано в [6,7], критерій мінімуму середньоквадратичного відхилення може бути представлений дещо по-іншому (запишемо його для дискретного випадку та для одного кроку по просторовій координаті):

$$I = \sum_{j=0}^N [P^*(0,t_j) - P(0,t_j)]^2 + \alpha k_1 \sum_{j=0}^N u^2(t_j). \quad (9)$$

Як передбачалося раніше, для методу крокових варіацій повинен бути заданий початко-

вий закон керування, починаючи з якого по-кращується рішення. Приблизно початковий закон керування може бути заданий диспетчером. Наприклад, у вигляді:

– лінійної комбінації за часом

$$u^0(0, t) = L^0(t),$$

де L^0 - лінійний оператор. Лінійна комбінація проходить через точки А і В, тобто

$$L^0(t) \subset [A(u(D), 0), B(u^*(T), T)];$$

– кусково-лінійної залежності

$$u^0(t) = \begin{cases} L^0(t) \subset [A(u(0), 0); B(u(1/3T), 1/3T)] \\ \text{при } 0 \leq t \leq 1/3T; \\ u^*(T) \text{ при } 1/3T < t \leq T. \end{cases} \quad (10)$$

Інші види законів керування нульового наближення визнаються завданнями практики.

Алгоритм методу крокових варіацій представимо таким чином [8]:

1. У момент j задається значення функції $u^{(0)}(t_j)$ управління згідно (10) (змінюючи його на величину Δu отримуємо мале позитивне число). Зі змінюючою функцією зміниться гранична умова за тиском $P(0, t)$ на величину ΔP . Зміну керуючої функції оцінюють протягом двох кроків у часі в такий спосіб:

$$\begin{aligned} I_{i,j+1}^+ &= I_j^+ [P_{j-1}^{(0)}(0, t_{j-1}), P_j^{(0)}(0, t_j) - \Delta P] + \\ &+ I_{j+1}^+ [P_j^{(0)}(0, t_j) + \Delta P, P_{j+1}^{(0)}(0, t_{j+1})]; \\ I_{j,j+1}^- &= I_j^- [P_{j-1}^{(0)}(0, t_{j-1}), P_j^{(0)}(0, t_j) - \Delta P] + \\ &+ I_{j-1}^- [P_j^{(0)}(0, t_j) - \Delta P, P_{j+1}^{(0)}(0, t_{j+1})]; \\ I_{i,j+1} &= I_j [P_{j-1}^{(0)}(0, t_{j-1}), P_j^{(0)}(0, t_j)] + \\ &+ I_{j+1}^+ [P_j^{(0)}(0, t_j), P_{j+1}^{(0)}(0, t_{j+1})], \end{aligned} \quad (11)$$

де функціонал I визначається за другим значенням функції в дужках. Перше значення функції просто вказує, з якого стану попереднього кроку було здійснено перехід.

Збурення функції P від зміни $u(t)$ визначається за знайденою витратою на лівій межі ділянки, що рівнозначно витраті через КС і тиску на кінці попередньої ділянки.

При розрахунках варіації вхідного тиску і витрати КС вони локалізуються, тобто приймаються постійними на даному кроці, а зміна функції керування, в основному, впливає тільки на вихідний тиск. Таке положення в ітераційному методі припустимо.

2. Значення нового наближення $u^{(1)}(t_j)$ та

$P_j^{(1)}(0, t_j)$, вибирається за мінімумом функціоналу (11). Для багатоділянкового газопроводу варіації функції управління з аналогічною процедурою оцінюють і для просторової координати. Для цього в критерій (9) вводять додаткові схеми.

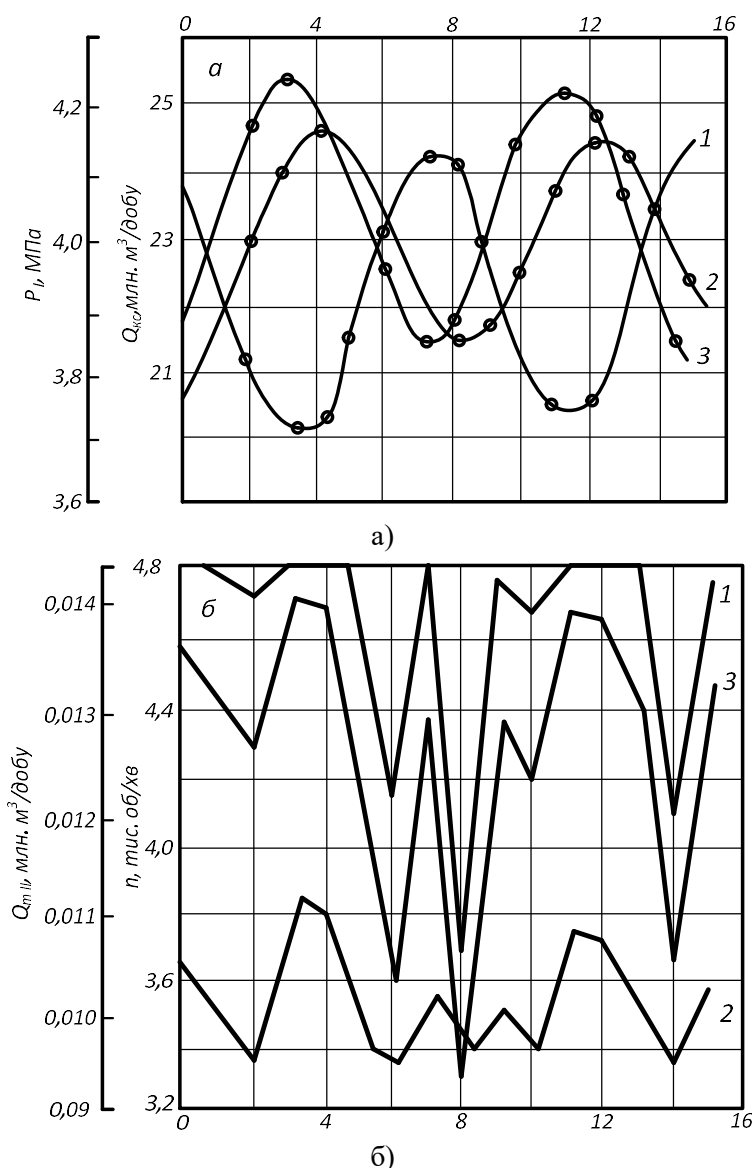
3. У момент t_N перевіряють функціонал на збіжність, тобто порівнюють значення попередньої ітерації з розрахованою, якщо абсолютна різниця функціоналів менша заданої величини, то пошук оптимального закону керування закінчується.

Метод крокових варіацій дозволяє врахувати обмеження на координати стану і керування і є досить простим алгоритмом. Однак застосовувати його до задач керування транспортом газу в динаміці – недоцільно. Цей метод можна застосувати для випадку, коли потрібно підібрати оптимально стабільні вихідні тиски компресорних станцій.

В основу реалізації задачі покладено аналітичний розв'язок лінеризованої системи рівнянь руху і нерозривності для оптимізації режимів роботи компресорних станцій.

Результати

Задача розв'язана для умов газопроводу «Братерство» з двома ділянками і двома КС, оснащеними агрегатами ГТК-Ю. Масова витрата стаціонарного режиму роботи газопроводу на початковий момент часу складала 23,8 млн м³/добу. Нестационарний процес в газопроводі викликаний зниженням витрати газу в кінцевому пункті на величину 30%, тобто до 16,7 млн. м³/добу впродовж 5,2 годин (18720 с). Задача полягає в прогнозуванні керуючих впливів з метою найбільш швидкого виходу на новий стаціонарний режим при забезпеченні мінімальних енерговитрат на транспортування газу. Результати розрахунків за наведеною методикою подані у вигляді графіків на рисунках 1,2. На рисунку 1 представлені результати розрахунків вихідних тисків на КС і витрат тисків в кінцевому пункті. При цьому тиск на виході КС-1 встановився максимальним, тиск на виході КС-2 дорівнює 5,4 МПа. Зауважимо, що амплітуда коливань уздовж газопроводу гаситься, а зсув по фазі зростає. Результати розрахунку керуючих впливів на швидкість обертання роторів машин, які представлені у вигляді кривих на рисунку 1б, сильно коливаються. Це викликано тим, що витрата через КС і тиск на вході пов'язані оберненою залежністю і, змінюючись



*а: 1 – тиск на виході I КС, 2 – витрата газу через II КС;
б: 1 – швидкість обертання роторів агрегатів першого ступеня II КС, 2 – швидкість обертання роторів агрегатів другого ступеня II КС, 3 – об’єм паливного газу II КС*

Рисунок 1 – Криві зміни режимних параметрів(а), швидкості обертання роторів нагнітачів і об’ємів паливного газу(б) в часі

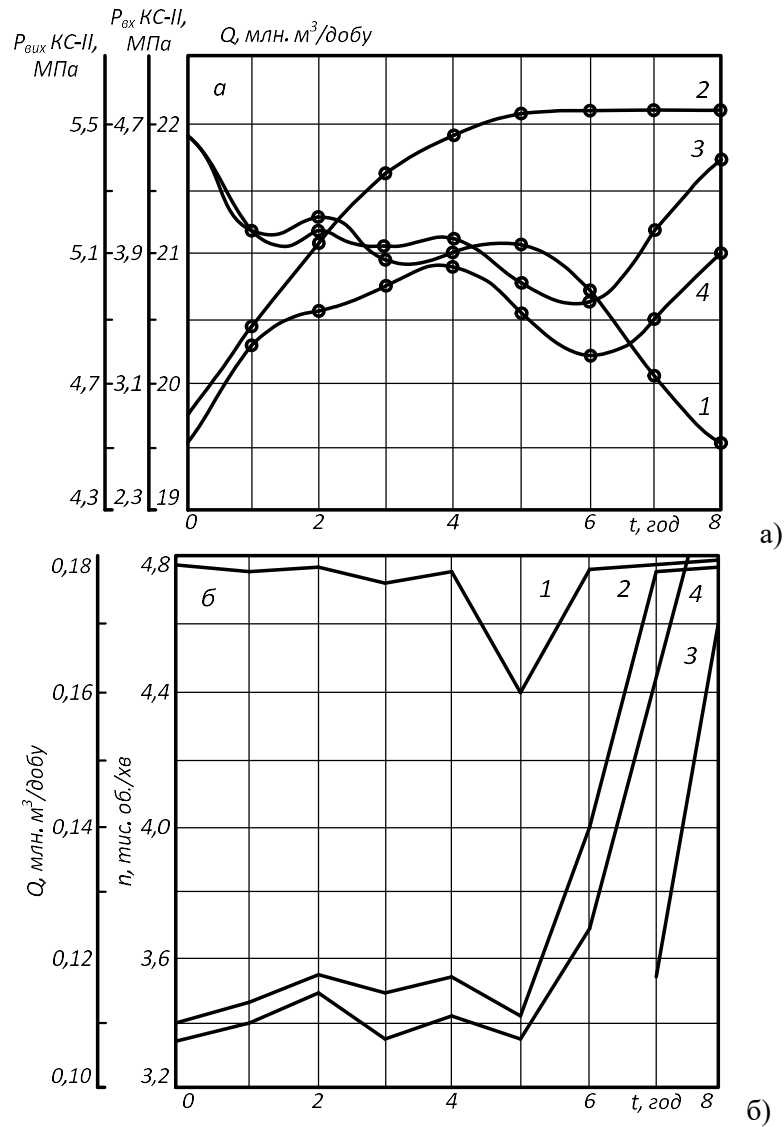
в часі, створюють нерівномірний режим перекачування газу на компресорних станціях.

При реалізації розрахункових керуючих впливів необхідно враховувати їх тривалість. Недоцільно, наприклад, перемикати швидкість обертання роторів з мінімальних величин на максимальні на короткий проміжок часу (лише на годину). Всі зміни швидкості обертання роторів відображаються на величині витрати паливного газу, КС-1 працює в полегшеному режимі.

Розглянемо другий приклад оптимізації режимів при нестационарних умовах течії газу. Вирішимо більш загальну задачу переходу ре-

жимів газопроводу з одного стану в інший відповідно до критерію типу (8). В даному випадку початковий закон керування у вигляді вихідних тисків представляються як експоненти. Крім того, в цій задачі пропонується варіація тисків не по кроках у часі, а набором функції вихідних тисків у відповідності до вихідних залежностей. Таким чином, замість крокових варіацій в цьому випадку використовують функціональні варіації, що значно підвищує оперативність методу.

Для проведення розрахунків одної варіації використаємо аналітичне рішення при лівій граничній умові у вигляді експоненти і правій –



а: 1 – тиск на вході II КС, 2 – тиск на виході II КС, 3 – витрата газу через I КС, 4 – витрата газу через II КС; **б:** 1 – швидкість обертання роторів агрегатів першого ступеня II КС

Рисунок 2 – Криві режимних параметрів ділянок газопроводу(а) і керуючих впливів на КС(б) в часі

в якості реального графіка зміни витрати [9]. Обидві функції подамо у вигляді рядів Фур'є. Тоді розв'язок отримаємо у вигляді:

$$\begin{aligned}
 P(x,t) = & C + \sum_{n=1}^N \left\{ d_n \sin wnt + \right. \\
 & + \beta x \sin wnt \sum_{j=1}^K \sum_{k=0}^K \left[\frac{(\gamma_j d_k + d_j l_k) w^{2j}}{\mu^2 k + w^{2j}} \sin(wt) - \right. \\
 & \left. \left. \frac{(d_j l_k + \gamma_j d_k) w_j}{\mu_k^2 + W_j^2} \mu_k (\cos w_j t - e^{-\mu_k t}) \right] \right\} + (12) \\
 & + \frac{2}{l_0} \sum_{k=0}^K e^{-\mu_k t} \int_0^K (f(x) - C - \beta x) \sin \frac{\pi x}{2l_0} (2k+1) dx,
 \end{aligned}$$

$$\text{де } \mu_k = \frac{\pi^2}{4l_0^2} (2k+1)^2 a;$$

$$d_k = \frac{(-1)^k}{\pi^2 (2k+1)^2};$$

$$e_k = \frac{4}{\pi(2k+1)};$$

$f(x)$ - стаціонарний розподіл тиску,

C - постійна складова лівої граничної умови.

На рисунку 2 видно, що форсоване зростання тиску нагнітання і одночасний вихід з провалу графіка витрати забезпечуються тільки збільшенням числа компресорних машин і максимального завантаження агрегатів. Обсяги

паливного газу вимірюються в часі в значних межах.

Висновки

Запропонована методика вибору раціональних керуючих впливів для оптимізації нестационарних режимів експлуатації складних газотранспортних систем в умовах їх неповного завантаження дозволяє вибрати перехід компресорних станцій складної газотранспортної системи з одного режиму функціонування в інший, підтримати її стан при різних збудовуючих впливах при виконанні умови мінімуму сумарних експлуатаційних витрат.

Для практичної реалізації поставлених задач запропоновано метод крокових варіацій, для якої повинен бути заданий початковий закон керування, починаючи з якого рішення покращується. Метод крокових варіацій дозволяє врахувати обмеження на координати стану і керування та є досить простим алгоритмом, його можна застосувати для випадку, коли потрібно підібрати оптимально стабільні вихідні тиски компресорних станцій.

З метою універсалізації методу пропонується варіація тисків не за кроками у часі, а набором функції вихідних тисків КС у відповідності з вихідними залежностями, тобто використати функціональні варіації, що значно підвищить оперативність методу.

Література

1. Яковлев Є.І., Казак О.С., Михалків В.Б., Тимків В.Ф., Грудз В. Я. Режими газотранспортних систем. Львів: Світ, 1993. 170 с.

2. Грудз В. Я., Грудз Я. В., Рудко В. В. Оцінка технічного стану елементів газоперекачувального агрегату компресорної станції магістрального газопроводу. *Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ*. 2011. №1(38). С. 88-90.

3. Бобровский С. А., Щербakov С. Г., Яковлев Е. И. и др. Трубопроводный транспорт газа. М.: Наука, 1976. 491 с.

4. Грудз В.Я., Грудз В.Я. (молодший) Нестационарні процеси в газотранспортних системах за умови їх неповного завантаження. *Нафтогазова енергетика: Матеріали 6-тої Міжнародної науково-технічної конференції (Івано-Франківськ, 15-19 травня 2017)*. Івано-Франківськ, 2017. С. 213.

5. Grudz V.Ya., Grudz (junior) V.Ya., Zapukhlyak V.B., Kyzymyshyn Ya.V. Non-stationary processes in the gas transmission systems at com-

pressor stations shut-down. *Journal of hydrocarbon power engineering*. 2018. №1(5). P. 22-28.

6. Zapukhlyak V., Poberezhny L., Maruschak P., Grudz Jr. V., Stasiuk R., Brezinová J., Guzanová A. Mathematical modeling of unsteady gas transmission system operating conditions under insufficient loading *Energies*. 2019. Vol. 12, Issue 7 (April-1 2019). P. 1–14. EISSN 1996-1073.

7. Zapukhlyak V., Grudz V., Melnychenko Yu., Stanetsky A., Polutrenko M., Poberezhny L.. Providing operability of gas pipelines in combat zones: *I-th International scientific and technical conference "Prospects for the development of mechanical engineering and transport – 2019"*. Vinnytsia. 13-15 may 2019. P. 204-205.

References

1. Rezhymy hazotransportnykh system / Ye. I. Yakovliev, O. S. Kazak, V. B. Mykhalkiv, V.F. Tymkiv, V. Ya. Hrudz. Lviv: Svit, 1993. 170 p. [in Ukrainian]

2. Hrudz V.Ya., Hrudz Ya.V., Rudko V.V. Otsinka tekhnichnoho stanu elementiv hazoperekachuvального ahrehatu kompresornoї stantsii mahistrального hazoprovodu. *Rozvidka i rozrobka naftovykh i hazovykh rodovyshch*. 2011. No 1(38). P. 88-90. [in Ukrainian]

3. Bobrovskiy S.A., Scherbakov S.G., Yakovlev E.I. idr. Truboprovodnyy transport gaza. M.: Nauka, 1976. 491 p. [in Russian]

4. Hrudz V.Ia., Hrudz V.Ia. (molodshyi) Nestatsionarni protsesy v hazotransportnykh systemakh za umovy yikh nepovnoho zavantazhennia. *Naftohazova enerhetyka: Materialy 6-toї Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii 2017*. (Ivano-Frankivsk, 15-19 travnia 2017). P. 213. [in Ukrainian]

5. Grudz V.Ya., Grudz (junior) V.Ya., Zapukhlyak V.B. Non-stationary processes in the gas transmission systems at compressor stations shut-down. *Kyzymyshyn Journal of hydrocarbon power engineering*. 2018. No 1(5). P. 22-28.

6. Zapukhlyak V., Poberezhny L., Maruschak P., Grudz Jr. V., Stasiuk R., Brezinová J., Guzanová A. Mathematical modeling of unsteady gas transmission system operating conditions under insufficient loading *Energies*. 2019. Vol. 12, Issue 7 (April-1 2019). P. 1–14. EISSN 1996-1073.

7. Zapukhlyak V., Grudz V., Melnychenko Yu., Stanetsky A., Polutrenko M., Poberezhny L.. Providing operability of gas pipelines in combat zones: *I-th International scientific and technical conference "Prospects for the development of mechanical engineering and transport – 2019"*. Vinnytsia. 13-15 may 2019. P. 204-205.