

ЗАДАЧІ КЕРУВАННЯ ПОТОКАМИ В СИСТЕМАХ ТРАНСПОРТУВАННЯ ГАЗУ

© Притула Н., 2012

Розглядається газотранспортна система із складною технологічною схемою та газодинамічні процеси, які в ній відбуваються. Сформульовані основні задачі на знаходження параметрів керування технологічними процесами транспортування газу та розроблено алгоритми їх побудови.

Ключові слова: газотранспортна система, компресорна станція, технологічні об'єкти, оптимальне керування.

The gas transport system with the technological scheme of big degree of complexity and gas-dynamic processes which occur in it are considered. The main objectives of parameters finding of technological processes control of gas transportation are formulated and algorithms of their construction are developed.

Key words: gas transport system, compressor station, technological facilities, optimum control.

Вступ

Задачам керування газодинамічними процесами в складних нелінійних системах з розподіленими параметрами (дискретно так і неперервно) та з обмеженими ресурсами присвячена незначна кількість робіт [1–6]. Одна із проблем – відсутність загальних підходів і методів розв'язування таких задач. Кожна з таких задач вимагає індивідуального підходу. Особливостями систем транспортування газу є значна розмірність системи, багатофакторність впливу на технологічні процеси, невелика точність прогнозу параметрів зовнішнього середовища та параметрів газу на її входах та виходах.

Постановка задачі оптимального керування. Якісний опис

Газотранспортна система (ГТС) є керованим об'єктом, а точніше керованим є технологічний процес транспортування та зберігання газу. Керування, як дискретними, так і неперервними процесами, здійснюється: зміною стану запірної арматури, зміною продуктивності газоперекачувальних агрегатів (ГПА) компресорних цехів (КЦ), зміною параметрів газових потоків на її входах та виходах. Керування, для певного класу задач, можна здійснювати і зміною коефіцієнта гідравлічного опору ділянки газопроводу (редукування газу), заміною ГПА, або його складових частин тощо.

Технологічну схему ГТС представимо у вигляді графа $G(E, V)$ в якого всі вершини є пронумерованими, а об'єкти, які мають протяжність, подані у вигляді (i, j) – ребер (дуг) з вершинами i та j . Позначимо через q_{ij}^+ , q_{ij}^- витрату (потік) газу на вході та виході ділянки газопроводу (i, j) . Вважаємо, що для ділянки газопроводу (i, j) завжди знайдеться такий інтервал часу $[t_1, t_2]$, що заміри тиску (витрати) на його вході і виході протягом вказаного часу дозволяють знайти, із задовільною точністю, витрати (тиски) газу на його кінцях. Для простоти, множину вершин та множину номерів вершин позначати однією буквою.

Заданим вважатимемо графи – $G(E,V)$ технологічної схеми ГТС, $G_{ij}(E,V)$ ($(i,j) \in A_{ks}$ технологічних схем КС, $G_j(E,V)$ ($j \in A^+$ – відбір газу із сховища, $j \in A^-$ – закачування газу в сховище) технологічних схем ПСГ, а також:

- а) вхідні потоки (джерела) – $Q_i^+(t)$ з параметрами газу $P_i(t), \rho_i(t)$ $i \in A^+ \subset E$;
- б) відбори газу – $Q_j^-(t)$ $j \in A^- \subset E$;
- в) вершини заміру параметрів газу (тиску та температури) – $\{P_k(t_i), T_k(t_i)\}$ $k \in A_{PT} \subset E$;
- г) заміри витрати – $q_{ij}^+(t)$ або $q_{ij}^-(t)$ або $q_{ij}^+(t), q_{ij}^-(t)$ ($(i,j) \in A_q \subset V$);
- д) параметри термогідрравлічного стану (коефіцієнт гідрравлічного опору) ділянок газопроводів $\lambda_{ij}(t)$ ($(i,j) \in A_\lambda \subset V$);
- е) параметри термогідрравлічного стану ГПА (політропічний коефіцієнт корисної роботи) η_{pol} – ($(i,j) \in A_\eta \subset V$);
- ж) параметри зовнішнього середовища (температура та коефіцієнт теплопередачі зовнішнього середовища) для ділянок газопроводів – $T_{ij}(t), K_{ij}(t)$ ($(i,j) \in A_{gz} \subset V$);
- з) параметри зовнішнього середовища для ГПА ($(i,j) \in A_{qp} \subset V$);

Вважаємо, що виконується така балансова рівність:

$$Q_i^+(t) + Q_j^-(t) + Q_{ij}^p(t) + \Delta\Omega_{ij}(t) + Q_{ij}^-(t) = 0,$$

де $\Delta\Omega_{ij}$ – зміна об'єму акумульованого газу; Q_{ij}^- – безповоротні втрати газу внаслідок негерметичності системи; Q_{ij}^p – відбір газу на потреби КС (переважно це паливний газ для газотурбінних приводів).

Задачі оптимального керування завжди передують задачі ідентифікації. Точність її розв'язання впливає на точність знаходження режимних параметрів, а також на точність формування параметрів керування газопотоками в ГТС. Процес формування параметрів керування полягає в знаходженні компромісу між надійним і оптимальним керуванням.

Постановка задачі оптимального керування. Математичний опис

Для простоти постановки задачі вважатимемо, що хімічний склад та масові частки складових газу на входах системи є постійними і в часі незмінними, а КС задаються тисками на їх виходах.

За значеннями $\{P_j(t_i), T_j(t_i)\}$ ($j \in E$) тисків і температури у вершинах графа технологічної схеми розраховують всі параметри керування ГТС.

Розглянемо об'єкт керування, стан якого в кожен момент часу $t = t_0, t_1, \dots, t_n$ описується n наборами, в кожен який, зокрема, входять n_i ($i = \overline{1, n}$) пар чисел. Кожен набір пар чисел пов'язаний з відповідною кількістю вершин $|J|$, в яких відбувається реєстрація пар чисел $\{P_j(t_i), T_j(t_i)\}$. Потужність множини (набору) індексів $\{j\} \in E \in |J|$. Такі пари чисел називаються фазовими координатами. Оскільки вони залежать від часу, то їх також називають фазовими змінними. Вказані набори пар чисел можна інтерпретувати як координати деякого вектора, який ми назвемо фазовим вектором.

Отже, стан об'єкта в кожен момент часу можна зобразити точкою в J -мірному арифметичному просторі, який назвемо фазовим простором об'єкта. Ця точка міняється в часі, описуючи деяку поверхню, яка називається фазовою поверхнею. Якщо фазова поверхня є неперервною, то система називається *інерційною*.

Нехай множина $S \subset R_2^n$ являє собою сукупність всіх фазових станів, в яких керованому об'єкту дозволяють перебувати. Тоді $x(t) \in S \subset R_2^n$ і це означає, що на фазові змінні накладені обмеження, тобто фазові обмеження.

Припустимо, що керування визначається, в кожен момент часу, набором із r величин u_1, u_2, \dots, u_r , які називаються керуючими параметрами. Можна вважати, що вони утворюють вектор $\bar{u} = (u_1, u_2, \dots, u_r)^T$, який називається вектором керування. Зміна керуючих параметрів в часі, означає, що ми маємо справу з вектор-функцією $\bar{u}(t) = (u_1(t), u_2(t), \dots, u_r(t))^T$.

Сукупність керуючих функцій утворюють в R_2^r деяку множину U , тобто $u(t) \in U \subset R_2^r$ і ця множина U називається множиною допустимих керувань або областю керування. В якості керування будуть кусково-неперервні вектор-функції, тобто такі, у яких координати можуть мати розриви першого роду. Закон руху об'єкта, який описує динаміку газових потоків, описується системою диференціальних рівнянь в частинних похідних

$$\bar{x}' = f(t, \bar{x}, \bar{u}), \quad (1)$$

$f(t, \bar{x}, \bar{u}) = (f_1(t, \bar{x}, \bar{u}), \dots, f_n(t, \bar{x}, \bar{u}))^T$ – відома функція, конкретний вигляд визначається особливостями об'єкта.

Задача керування

Нехай в фазовому просторі задана множина S , а також множина допустимих керувань U . Керування $\bar{u}(t)$ $t \in [t_1, t_2]$ переводить об'єкт (1) із стану $\bar{x}(t_1)$ в стан $\bar{x}(t_2)$, якщо відповідна цьому допустимому керуванню фазова траєкторія $\bar{x}(t)$ (розв'язок задачі Коші з початковими умовами $\bar{x}(t_1) = \bar{x}^1$) визначена на цьому відрізку часу, тобто задовольняє фазові обмеження і при $t = t_2$, $\bar{x}(t_2) = \bar{x}^2$.

Для знаходження кусково-неперервної функції $\bar{u}(t)$ загальних рекомендацій не має, а доведення розв'язності задачі керування становить значні труднощі.

Крайові умови в задачах керування

Розглянемо основні можливі типи крайових умов. Серед них можна виділити такі:

а) якщо множина M , характеризує ціль керування, збігається зі всім фазовим простором R_2^n , то таку задачу називають задачею із вільним кінцем. То в цьому разі значення крайових умов виконують початкові умови $\bar{x}(t_1) = \bar{x}^1$.

б) *задачі з фіксованими кінцями* $\bar{x}(t_1) = \bar{x}^1$, $\bar{x}(t_2) = \bar{x}^2$, при цьому інтервал часу керування $t \in [t_1, t_2]$ може бути заданим, або потрібно його знайти. У такому разі множина цілі M складається із однієї точки.

в) *багаточкові задачі керування*, у цьому разі для деяких фіксованих моментів часу t_1, t_2, \dots, t_n можуть бути задані значення деяких координат вектора стану.

г) *задачі з рухомими кінцями*, тут вимагається керування, яке переводить об'єкт із деякого (наперед відомого) стану $\bar{x}^1 \in H_1$ в деякий стан $\bar{x}^2 \in H_2$. Часто ці множини є гіперповерхнями в R^n .

Критерії якості

Припустимо, що задача керування є розв'язною. Але може бути нескінченна кількість розв'язків, а значить і нескінченна кількість керувань.

У такому разі може бути поставлена *задача оптимального вибору*: серед допустимих керувань вибрати таке, за якого керований процес буде найкращим в деякому визначеному сенсі, тобто потрібно вибрати числову характеристику, яка залежно від керування приймала б мінімальне чи максимальне значення. Цю числову характеристику називають *критерієм якості*. Критерій якості являє собою функціонал, і за його допомогою отримуємо середню характеристику всього процесу.

Отже, задача оптимального керування полягає в тому, щоб знайти таке керування $\bar{u}(t)$, яке реалізує ціль і для якого функціонал приймає екстремальне значення. У цьому разі керування $\bar{u}(t)$ називають оптимальним керуванням, відповідну фазову траєкторію – оптимальною траєкторією, а процес $(\bar{x}(t), \bar{u}(t))$ – оптимальним процесом.

Для керованих процесів із законом руху (1) найчастіше використовують інтегральний критерій якості, тобто знаходиться екстремум функціонала, який забезпечує

- а) критерій оптимальної швидкодії;
- б) критерій точності роботи системи (відхилення в середньому по фазових координатах);
- в) енергетичний критерій (затрати енергії);
- г) змішані інтегральні критерії.

Задачі керування

Розглянемо розрахункову схему газотранспортної системи, яка однозначно задається графом її технологічної схеми $G(V, E)$, характеристиками технологічних об'єктів, обмеженнями $s_{ij} \in S$ на газові потоки в об'єктах $(i, j) \in E$ типу ребро; параметрами стану газу $\{P_i, T_i\}$ ($i \in V_3$), $\{Q_j^+, P_j, T_j, \rho_j\}$ ($j \in V_1$) і $\{Q_k^-, P_k\}$ ($k \in V_2$) у вершинах технологічної схеми газотранспортної системи. Прогнозований режим на часовому інтервалі часу $[0, t]$ задається: значеннями тисків в окремих вершинах P_i ($i \in \{1, 2, \dots, n\}$), або інтервалами їх зміни; плановими змінами станів (закрито-відкрито) кранів, зміною параметрів потоків газу на входах і виходах ГТС; технологічними обмеженнями на параметри газових потоків і параметрами керування; складом контрольованих параметрів; переліком дозволених керувань $u_{ij} \in U$; часовими параметрами керування (середній час виходу ГПА на стаціонарний режим; час необхідний на відкриття чи закриття керованих і некерованих кранів); обмеженнями на швидкість зміни параметрів газових потоків; ціллю керування.

Компонентами $u_{ij}(t_p, t_k, A_{ij})$ вектора керування \vec{u} є: зміна стану запірної та регулюючої арматури та (або) продуктивності КС. Тут t_p – початок керування, t_k – завершення керування, A_{ij} – параметри керування.

Режим $R_s(\vec{u}, s, t) \in R_s$ роботи ГТС на час t визначається: графом її технологічної схеми $G(V, E)$, зосередженими параметрами P_i, T_i ($i \in V$), розподіленими параметрами $q_{ij}, p_{ij}, T_{ij}, \rho_{ij}$ для всіх $(i, j) \in E$ і режимами роботи КС. Усі режимні параметри роботи ГТС повинні перебувати в технологічно допустимих межах.

Задача 1. На інтервалі часу $[0, t]$ знайти такий вектор керування $\vec{u}(\{u_{ij}(t_n, t_k, A_{ij})\}, t) \in U$, для якого виконується $R_s(\vec{u}, s, t) \in R_s$ і який мінімізує критерій оптимальності $W = \int_0^T W(t) dt$, де $W(t) = f(\vec{u}, s, t)$ – затрати енергії на режим в кожен момент часу t .

Основною задачею керування є: мінімізація величини W за умов забезпечення технологічних обмежень, виконання контрактних умов та забезпечення заданої надійності роботи об'єктів і системи загалом.

Сформулюємо задачу для магістрального газопроводу з n компресорними станціями. Вхід/вихід такої системи характеризується параметрами (P_0, T_0, q_0, t) і $(P_{2n-1}, T_{2n-1}, q_{2n-1}, t)$ відповідно. Параметри на вході КС і вектор керування однозначно визначають параметри на виході КС і паливно-енергетичні затрати q_p . Так для i -ї КС маємо $P_{2i-1} = P_{2i-1}(P_{2i-2}, T_{2i-2}, q, u_i)$, $T_{2i-1} = T_{2i-1}(T_{2i-2}, P_{2i-2}, P_{2i-1}, u_i)$ і $q_{pi} = \varphi_i(P_{2i-2}, T_{2i-2}, q_i, u_i)$.

Адитивна функція цілі для магістрального газопроводу матиме вигляд

$$\Phi = \sum_{i=0}^n \varphi_i(P_{2i-2}, T_{2i-2}, q_i, u_i), \text{ де } q_i = q_{i-1} - q_{pi}.$$

Задача 2. Для відомих умов на входах/виходах магістрального газопроводу (P_0, T_0, q_0, t) і (P_{2n-1}, T_{2n-1}, t) знайти такі керування $\vec{u}_1, \vec{u}_2, \dots, \vec{u}_n$, щоб функція цілі Φ досягала свого мінімального значення, за умови, що всі вхідні та вихідні тиски перебувають в заданих межах.

Задача 3. Для відомого розподілу тисків $P_0, P_2, \dots, P_{2n-2}, P_{2n-1}$ знайти таке керування $\bar{u}_1, \bar{u}_2, \dots, \bar{u}_n$, щоб функція цілі Φ досягала мінімального значення.

Задача 4. Для заданого сумарного об'єму акумульованого в трубах газу знайти такий розподіл тисків $P_0, P_2, \dots, P_{2n-2}, P_{2n-1}$ і керування $\bar{u}_1, \bar{u}_2, \dots, \bar{u}_n$, щоб функція цілі Φ досягала мінімального значення.

Розглянемо множину системних об'єктів керування. Кожна j -та компресорна станція, яка цій множині належить, вхідний потік з параметрами (q_j, P_j, T_j) розподіляє між магістральними газопотоками з параметрами (q_{js}, P_{js}, T_{js}) $s = \overline{1, m}$, де $q_j = \sum_{s=1}^m q_{js} + q_{pj}$, де q_{pj} – витрата паливного газу.

Зауважимо, що активне значення у перерозподілі потоків газу в ГТС, у доволі широких діапазонах, мають компресорні станції. Усі інші, за винятком пристроїв редукування газу з підземних газосховищ, виконують пасивну функцію. Параметри газового потоку, як правило, істотно залежать від перепаду тисків на їх входах і виходах. Для пасивних об'єктів керування газопотоками витрата газу розраховується так:

- через редуктор проходить газовий потік, витрата якого дорівнює дисбалансу газу між об'ємами надходження і відбору газу в підсистемі, в якій редуктор є джерелом газу (параметр керування – тиск на виході редуктора);
- через пристрої звуження газового потоку витрати газу розраховуються з використанням моделей газових потоків, які проходять через різноміснні пристрої звуження газового потоку (параметр керування – діаметр пристрою звуження потоку).

Розв'язування першої задачі передбачає знаходження також системних параметрів керування, які б забезпечили, на заданому часовому інтервалі, мінімальні паливо-енергетичні затрати для функціонування ГТС у заданому режимі.

Система формування параметрів керування газопотоками

Щоденно у підрозділах і загалом по ГТС розраховують сумарні об'єми притоків і відборів газу, а також об'єми газу, акумульованого в трубопроводах. Ці дані дозволяють сформувати добовий баланс газу як для системи, так і його підсистем. Як правило, постійно отримують певну різницю між об'ємами газу, який надійшов і який відібрано, величина його є важливою інформацією для прийняття рішень про зміну керування ГТС. Втручання (зміна параметрів керування газопотоками) у процес зміни об'ємів акумульованого газу в підсистемах називають збалансуванням підсистем. Система керування газопотоками включає ідентифікацію фактичних параметрів стану технологічного обладнання та об'єктів; прогнозування і розрахунок параметрів для системи прийняття рішення про зміну параметрів керування; оптимального планування режимів транспортування, зберігання і розподілу газу; оптимального балансування потоків газу; формування параметрів керування і його регламенту; формування розрахункових схем ГТС; аналіз і інтерпретацію розрахованих величин.

Розглянемо деякі принципи оптимального керування, без їх обґрунтування, в умовах відсутності нештатних ситуацій і нечіткого прогнозування:

- процеси відновлення дисбалансу між об'ємами надходження і відборами газу в підсистемах повинні бути в технологічних межах контрольованих параметрів і їх швидкість повинна узгоджуватися зі швидкістю зміни величини дисбалансу газу як в системі, так і в сусідніх підсистемах;
- кожна зміна керування, на певному проміжку часу, повинна приводити до мінімізації енергетичних затрат;
- на кожному інтервалі часу проводити мінімальну кількість змін (керуючих дій);
- проводити, насамперед, такі зміни, які роблять найбільший внесок у мінімізацію енергетичних затрат;
- у разі достатньо нечіткого прогнозу на характер зміни вхідних та вихідних параметрів систему підтримувати в технологічних межах за мінімальних змін в ГТС;
- зміни спрямовані на зменшення сумарних енергетичних затрат;
- керування повинно бути таким, щоб швидкість зміни контрольованих параметрів була максимально повільною і їх значення наближалось до середнього значення, яке перебуває в розрахованих технологічних межах параметрів газодинамічних процесів.

Розрахунок параметрів керування

Основним інтегральним показником роботи ГТС є сумарний акумульований об'єм газу $Q_{\Sigma}(t)$ у системі та його добова зміна ΔQ . Оптимальна робота ГТС пов'язана як з величиною $Q_{\Sigma}(t)$, так і його розподілом у системі. Дисбаланс газу в системі визначається співвідношенням

$$\Delta Q(t) = \sum_i \left(\int_0^t (Q_i^+(t) - Q_i^-(t) + Q_i(t)) dt - Q_{\Sigma}(0) + Q_{\Sigma}(t) \right),$$

де $Q_i^+(t)$ – надходження, $Q_i^-(t)$ – відбори, $Q_i(t)$ – технологічні витрати та безповоротні втрати газу; $Q_{\Sigma}(t)$ – об'єм акумульованого газу в системі на момент часу t . Таку ж функцію дисбалансу будемо для всіх керованих підсистем ГТС. За сумарним акумульованим об'ємом газу у підсистемах можна розрахувати середній тиск і швидкість зміни дисбалансу в кожній підсистемі. Це дозволяє побудувати систему балансування підсистем за певним критерієм. Параметри балансування дозволяють сформулювати граничні умови для системи рівнянь на тиски, які можна отримати кількома способами. Один із можливих є таким. У разі нестационарних режимів транспортування газу для формування системи рівнянь використовують умову балансу газу у вершинах граф-схеми ГТС. Для всіх вершин (за винятком вершин типу надходження, відбір, початок і кінець закритих кранів, вершин, в яких задані параметри газу) будемо балансові рівняння

$$\sum_k q_{ki}^i(p_{ki}^i, p_{ki}^k) - \sum_j q_{ij}^i(p_{ij}^i, p_{ij}^j) + Q_i^+ - Q_i^- = 0,$$

де q_{ki}^i – витрата газу, яка входить у вершину i з ребра (k, i) , q_{ij}^i – витрата газу, яка виходить з вершин i в ребро (i, j) .

Ми отримали систему нелінійних рівнянь, яку потрібно розв'язати із врахуванням режимно-технологічних обмежень та заданих і розрахованих гранично-початкових умов. Розв'язування задач формування параметрів керування вимагають розробити моделі і алгоритми для:

- заміни моделі газових потоків на двох сусідніх ділянках газопроводів однією моделлю;
- відкриття і закриття кранів на ділянці газопроводу у наперед визначений час;
- зупинки роботи КС і забезпечення пропуску газу;
- введення в роботу ГПА або КС в цілому;
- перерозподілу балансу газу між підсистемами;
- побудови граничних умов для розв'язування нестационарних задач за заданими критеріями оптимізації;
- термо-гідравлічного розрахунку багатоцехових з різнотипними ГПА КС сумісно з прилеглими газопроводами;
- розрахунку газових мереж в умовах їх нестационарного функціонування.

Алгоритм побудови параметрів керування

Основними кроками алгоритму побудови параметрів керування є такі (рис. 1):

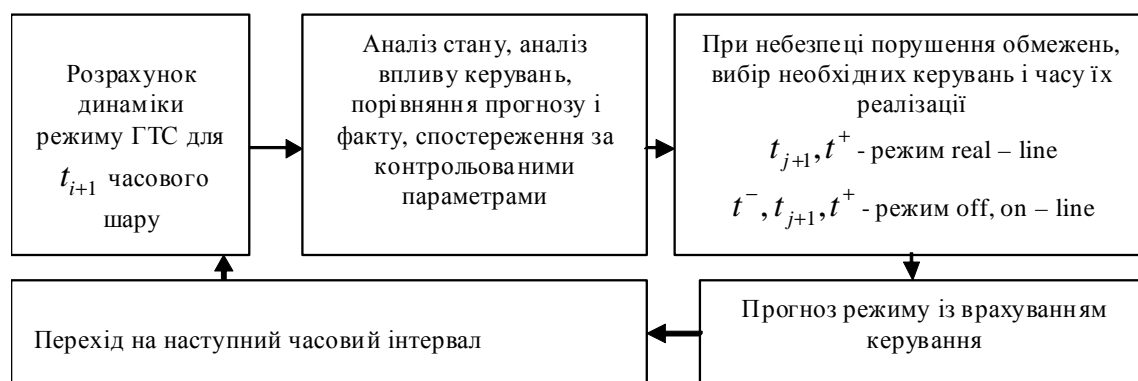


Рис. 1. Алгоритми формування параметрів керування

1. Провести ідентифікацію параметрів стану технологічних об'єктів за замірними даними.
2. У граф-схемі $G(E,V)$ ГТС умовно видалити дуги типу КС. У цьому випадку граф $G(E,V)$ розпадеться на незв'язні компоненти (підграфи) $G_i(E,V)$. Для кожного підграфа $G_i(E,V)$ розрахувати середній тиск у підсистемах, динаміку зміни об'єму акумульованого газу в трубах.
3. Для кожної КС розрахувати запас її продуктивності, робочу область зміни режимних параметрів і провести перерозподіл витрати газу між цехами (для знаходження мінімальних енергетичних затрат).
4. Для кожного підграфа знайти сумарний запас продуктивності із врахуванням досяжних КС.
5. Враховуючи прогноз надходження і відбір, пікові характеристики ПСГ, стан об'єктів, сформувані технологічні межі зміни режимних параметрів роботи ГТС. Динамічні технологічні межі повинні формуватися із врахуванням: темпу зміни інтегральних характеристик як в цілій ГТС, так і її підсистемах, надійності експлуатації обладнання, критерію оптимальності чи принципів оптимального керування.
6. Формування умов перемикання, зміни керування. Можливими умовами зміни керування y_k є досягнення межі існування технологічності режиму за одним, чи кількома параметрами, або за швидкістю зміни контрольованого параметра. Деякі з умов керування – параметр y_k перебуває в області допустимих значень, керування непотрібно; параметр y_k перебуває в області керування, керування непотрібно, якщо

$$\frac{\partial y_k}{\partial t} \geq 0, y_k \geq y_{\min}; \frac{\partial y_k}{\partial t} \leq 0, y_k \leq y_{\max};$$

параметр перебуває в області керування, керування потрібно, якщо

$$\frac{\partial y_k}{\partial t} \geq 0, y_k \leq y_{\max}; \frac{\partial y_k}{\partial t} \leq 0, y_k \geq y_{\min}; \left| \frac{\partial y_k}{\partial t} \right| \geq \varepsilon_y.$$

7. Оцінка ситуації, планування на прогнозований час.

Висновки

У роботі запропоновано структуру системи керування, її інформаційну та алгоритмічну підтримку. Запропоновані підходи до формування параметрів керування газотранспортною системою покладено в основу системи, яка розробляється. Вони дали можливість побудувати швидкі та стійкі алгоритми оптимального оперативного керування газопотоками в ГТС, які перебувають в стадії апробації.

1. Панкратов В.С. Автоматизированная система диспетчерского управления ГТС/ Панкратов В.С., Вербило А.С. – М.: Изд-во ООО "ИРЦ Газпром", 2002. –98 с. 2. Сарданаишвили С. А. Расчетные методы и алгоритмы / Сарданаишвили С. А. – М.: Изд-во "Нефть и газ", 2005. – 577 с. 3. Селезнев В. Е. Методы и технологии численного моделирования газопроводных систем / Селезнев В. Е., Алешин В. В., Клишин Г. С. – М.: Едиториал УРСС, 2002. – 448 с. 4. Бобровский С. А. Трубопроводный транспорт газ / Бобровский С. А. Щербаков С. Г., Яковлев Е. И. – М.: Наука, 1976. – 475 с. 5. Ю.Сінчук. Моделювання роботи кранів на магістральних газопроводах / Ю. Сінчук, Н. Притула, М. Притула // Вісник Нац. ун-ту "Львівська політехніка": Комп'ютерні науки та інформаційні технології. – Львів, – 2010. – №663. – С. 216–222. 6. Сінчук Ю., Притула Н., Притула М. Моделювання нестационарних режимів газових мереж // Вісник Нац. ун-ту "Львівська політехніка". Комп'ютерні науки та інформаційні технології. – Львів, – 2010. – № 663. – С. 128–132.