

851. 12. Xia T., Zhu H., Shu H., Haigron P., Luo L. Image description with generalized pseudo-Zernike moments // JOSA, 2007, No. 24(1), pp. 50-9. 13. Shu H., Luo L., Coatrieux J.-L. Moment-based Approaches in Image. Part 1: basic features //IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine, 2007, No. 26(5), pp. 70-4.

УДК 622.692.4+622.691.24

**Н. Притула<sup>1,2</sup>, М. Притула<sup>1,2</sup>, І. Боярин<sup>2</sup>, В. Ямнич<sup>2</sup>, О. Гринів<sup>2</sup>, О. Химко<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Центр математичного моделювання ІППММ ім. Я.С.Підстригача НАН України,

<sup>2</sup>ТОВ “Математичний центр”,

<sup>3</sup>Національний університет “Львівська політехніка”

## **ІДЕНТИФІКАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ МОДЕЛІ ГАЗОТРАНСПОРТНОЇ СИСТЕМИ**

© Притула Н., Притула М., Боярин І., Ямнич В., Гринів О., Химко О., 2011

**Запропоновано швидкі алгоритми аналізу даних вимірювання на великих інтервалах часу та розв’язування систем нелінійних контурних рівнянь, які дали можливість розв’язати задачі ідентифікації в умовах невизначеності. Наведено класифікацію та характеристику невизначеностей. Запропоновано алгоритми знаходження параметрів моделей та стану об’єктів в умовах невизначеності.**

**Ключові слова: ідентифікація, невизначеність, розрахункова схема, газотранспортна система, компресорна станція, технологічні об’єкти.**

**Fast analysis algorithms of the measurement data during the big time intervals and solving of systems of the nonlinear contour equations which have given the chance to make problem definition of identification in the conditions of uncertainty are offered. The classification and the characteristic of existing uncertainties are carried out. Algorithms of finding models parameters and a objects state in the conditions of uncertainty are offered.**

**Keywords: identification, uncertainty, the settlement scheme, gas-transport system, compressor station, facilities.**

### **Вступ**

Для того, щоб забезпечити комплексний підхід до прийняття рішень у складній багаторівневій ієрархічній системі видобутку, транспорту, зберігання і розподілу газу, необхідно впроваджувати системи інформаційної підтримки задач розрахунку режимних параметрів. Основні базові проблеми, які потрібно вирішити, – проблема ідентифікації термогідрравлічного та технічного стану об’єктів, формування максимально збалансованих початково-граничних умов. Це дасть змогу розв’язувати задачі моделювання, оптимізації і формування параметрів управління нелійними, нестационарними газодинамічними процесами за наявного інформаційного забезпечення задач.

Невизначеність режимної інформації в основному полягає у відсутності замірів витрат, тисків і температур у багатьох вузлах газотранспортної системи (ГТС). Аналіз невизначеностей, характерних для процесу управління складними газотранспортними системами, показав, що:

- точність інформації низька, оперативна інформація неповна (значні похибки вимірювання, ненадійна і малопродуктивна система передавання даних, несинхронна система вимірювання і передачі даних, недоступна частина інформації тощо);
- моделі неточні (часто припускається однорідність підсистем за багатьма параметрами, не повністю враховується рельєф прокладання трубопроводів, вводяться нечіткі моделі типу термогідрравлічних еквівалентів, часто використовуються паспортні характеристики, які, як правило, відрізняються від реальних тощо).

Нечіткість процесу прийняття рішень в багаторівневих ієрархічних системах зумовлена тим, що немає чітких цілей і координуючих рішень на кожному рівні контролю і управління та не забезпечується координація управління для кожного локального об'єкта. Наявність диспетчерів у контурі управління спричиняє високий рівень суб'єктивізму, неоднозначну інтерпретацію інформації і результатів моделювання, низьку формалізацію рішень, зокрема, якщо прогноз нечіткий.

Виділимо невизначеності, про наявність яких немає згадок у літературі. Вважається, що параметри технологічних схем є відомими з достатньою точністю та існують паспорти всіх технологічних об'єктів. В реальних умовах виконано паспортизацію незначної частини ГТС, але й вона не гарантує достатньої точності та повноти схем. Пов'язано це із тим, що значна частина проектної документації відсутня і, крім цього, в процесі будівництва газопроводів вносилося багато змін. Для багатьох ділянок трубопроводів на технологічних схемах часто відсутні такі параметри, як довжина, внутрішній діаметр, висотна відмітка. Крім цього, в процесі експлуатації газопроводів їхній внутрішній діаметр може змінюватися, тобто збільшуватися.

Класифікацію та характеристику невизначеностей можна здійснити за:

- ступенем невизначеності: повна визначеність, імовірнісна, лінгвістична, інтервальна, повна невизначеність (невідомий прогноз нештатних подій);
- характером невизначеності: параметрична, структурна, ситуаційна.

Невизначеності можна розділити ще на три нечіткі класи: ліквідні, частково ліквідні і неліквідні.

Для постановки і розв'язування задач ідентифікації виконано: декомпозицію об'єктів управління із урахуванням систем вимірювання параметрів газу; вибір параметрів керування газопотоками; мінімальну ідеалізацію моделей складних термогідрравлічних процесів із максимальним урахуванням суттєвих зв'язків у технологічному комплексі; розроблення кількарівневої ієрархічної моделі системи. Крім цього, в моделях термогідрравлічних процесів враховано їх особливості – нестационарність, нелінійність, неізотермічність тощо.

Проблеми ідентифікації параметрів складних газотранспортних систем розглянуто у працях [1–3]. Цим роботам передувала робота [4] для енергетичних мереж. У ній сформульовано критерій ідентифікованості лінійних систем: кількість вимірювань і їхнє розміщення повинні бути такими, щоб ранг системи рівнянь (модель мережі) був не меншим, ніж кількість невідомих. Для магістральних газотранспортних систем результати більшості досліджень мають обмежене застосування. Це пов'язано із незначною кількістю приладів вимірювання витрат газу і тиску, а також з нелінійністю газодинамічних процесів. Переважно вимірювання тисків газу можна провести тільки на входах і виходах компресорних станцій (КС). На багатьох КС витрата взагалі не вимірюється. Істотною є робота ГТС в нестационарному режимі, вплив неточності вимірювання, невисока точність розрахунку параметрів багатокомпонентних газів, характер впливу великої кількості місцевих опорів тощо. У випадку, коли тиск вимірюється у всіх вершинах і газопровідна система задовольняє такі умови: граф-схема мережі є зв'язним графом, який не містить петель і паралельних ребер; вершини системи з нульовою витратою газу є вершинами зчленування графу (при їх видаленні граф стає незв'язним), – необхідною і достатньою умовами ідентифікованості будуть: пункти вимірювання вершинних витрат розподілені по вершинах мережі так, щоб для кожного ребра графу існував хоча б один простий ланцюг, який з'єднує це ребро принаймні з одним пунктом вимірювання, причому всі проміжні вершини є вершинами з нульовими вершинними витратами газу.

### Модель газотранспортної системи

ГТС може мати лінійну, деревоподібну або кільцеву структуру з міжсистемними перемичками. Математичною моделлю структури ГТС є частково орієнтований без петель, не обов'язково зв'язний граф  $G = (V, E)$ , який складається зі скінченної кількості вершин і ребер. Кожне ребро визначається парою вершин. Для позначення вершин графа використовуватимемо символи  $u_1, u_2, \dots, u_n$ , а для позначення ребер — їхні пари  $(u_i, u_j)$ . Ребра з однаковими вершинами називають паралельними. Якщо вершини  $u_i, u_j$  з'єднані лише одним ребром, то це ребро позначатимемо  $(i, j)$ .

Вершинами графу  $G = (V, E)$  ГТС є місця з'єднання трубопроводів і різнотипних об'єктів, поворотів, відгалужень, притоку чи відбору газу, а всі інші об'єкти, які характеризуються протяжністю, називають ребрами (трубопроводи, КС, запірні та регулювальні арматури, апарати повітряного охолодження (АПО), сепаратори тощо). Зовнішні притоки і відбори газу зосереджені у вершинах графу.

Моделі газових потоків у технологічних об'єктах містять параметри таких типів: режимні, стану та керування.

1. Модель газового потоку в трубі

$$P(x) = j_1(P_i, T_i, q_{ij}, D_1, I_{ij}, x), T(x) = j_2(P_i, P_j, T_i, q_{ij}, D_2, K_T, x) - (i, j) \in M \quad (1)$$

1.1 Обмеження:  $P(x) \leq P_{\max}(x)$ ;  $T_i \leq T_{\max}$ .

1.2 Параметри стану:  $I_{ij}, K_T$  – коефіцієнт гідравлічного опору і коефіцієнт теплопередачі від труби до зовнішнього середовища.

2. Модель газового потоку, який проходить через компресорну станцію:

$$P_j = j_3(q_{ij}, T_i, P_i, D_3, G, \bar{n}), T_j = j_4(T_i, P_i, P_j, D_4, h), Q_i = j_5(P_j, T_j, D_5, K_s, N) - (i, j) \in L \quad (2)$$

2.1 Обмеження:  $q_{\min} \leq q_{ij} \leq q_{\max}$ ;  $n_{\min} \leq n \leq n_{\max}$ ;  $T_j \leq T_{\max}$ ,  $N \leq N_{\max}$ .

2.2 Параметри стану:  $h, K_s$  – коефіцієнт політропічного ККД стиску газу ВН і коефіцієнт технічного стану приводу ГПА.

2.3 Параметри керування:  $q_{ij}, n, T_j, G$  – технологічна схема КС (схема з'єднання ГПА).

2.4. Параметри регулювання:  $P_j$ .

3. Модель місцевого опору

$$P_j - P_i = \Delta P = j_6(r, n, D_6), T_j = j_7(T_i, \Delta P, D_{di}, D_7), (i, j) \in K \quad (3)$$

4. Модель редуктора

$$q_{ij} = j_8(P_i, P_j) = \begin{cases} P_i \geq P_j, q_{ij} = Q \\ P_i < P_j, q_{ij} = 0 \end{cases}, (i, j) \in R_Q \quad (4)$$

4.1 Параметр керування –  $P_j$ .

5. Модель регулятора витрати

$$q_{ij} = j_9(\Delta P), \Delta P = P_i - P_j, (i, j) \in R_q. \quad (5)$$

5.1 Параметр керування –  $\Delta P$ .

6. Модель незворотного клапана

$$q_{ij} = j_{10}(P_i, P_j) = \begin{cases} q_{ij}, P_i > P_j \\ 0, P_i \leq P_j \end{cases}, (i, j) \in R_p. \quad (6)$$

7. Рівняння балансу масової витрати

$$\sum_i m_{ij} + \sum_k m_{jk} = 0, j \in V. \quad (7)$$

8. Рівняння теплового балансу

$$T_j \sum_k q_{jk} - \sum_i q_{ij} T_i = 0, j \in V. \quad (8)$$

9. Рівняння стану суміші газу

$$P \sum_k V_k = \sum_i x_i (PV)_i + \sum_j \sum_k x_j x_k F_{jk}(T, r), PV = Rf(T, r). \quad (9)$$

10. Модель пласту підземного сховища із зосередженими джерелами

$$j_{11}(x, y, p, T, r, h, k, m, a, \Gamma, \{x_i, y_i, q_i\}) = 0. \quad (10)$$

11. Модель вибою свердловини

$$j_{12}(p_{n,i}, P_{виб,i}, q_i, A_i, B_i) = 0. \quad (11)$$

12. Моделі сепараторів, пороховловлювачів та інших аналогічних технологічних об'єктів задаються емпіричними формулами виду

$$j_{13}(F, \Delta p, q_{ij}) = 0. \quad (12)$$

Позначення:  $D_l (l = \overline{1, 7})$  – набори відповідних коефіцієнтів, характеристик, обмежень тощо;  $j_i (i = \overline{1, 13})$  – деякі функції, подання яких залежить від вибраної моделі газового потоку для заданого об'єкта;  $Q_i^-$  – витрата паливного газу;  $x_i$  – мольні частки компонент газу,  $F_{ik}$  – функція взаємодії компонент газу, які визначають експериментально;  $A_i, B_i$  – фільтраційні коефіцієнти вибійної зони  $i$ -ї свердловини,  $i = \overline{1, I}$ ,  $I$  – кількість робочих свердловин;  $F$ ,  $\Delta p$  та  $q_{ij}$  – множина параметрів відповідних технологічних об'єктів, втрата тиску на них та об'ємна кількість газу, що, відповідно, проходить через них;  $M$  – множина ребер ГТС;  $L$  – множина КС;  $N$  – потужність КС;  $q_{\min}, q_{\max}$  – мінімальне та максимальне значення об'ємної витрати;  $n_{\min}, n_{\max}$  – мінімальне та максимальне значення обертів нагнітача;  $T_{\max}, N_{\max}$  – максимальні значення температури та потужності;  $K$  – множина місцевих опорів;  $V$  – множина вершин графу;  $(x, y)$  – декартові координати пласту сховища;  $R_q$  – множина регуляторів витрати газу;  $R_p$  – множина незворотних клапанів;  $\Delta P$  – депресія тиску на місцевих опорах та відповідних технологічних об'єктах.

### Задача ідентифікації

Перед розв'язуванням задачі ідентифікації треба усунути частину невизначеностей за замірами тиску, витрати та температури газу. Якщо, наприклад, тиск на вході та виході запірної арматури є приблизно однаковим упродовж значного інтервалу часу, то слід очікувати, що кран є відкритим. Задача ідентифікації розв'язується із врахуванням обмежень на технологічні режими, тобто є область існування технологічних режимів роботи ГТС. Обмеження задаються в контрольованих вершинах, переважно на тиски, точку роси та на температуру газу на виході КС. Існує вектор  $\bar{c}(\{c_i\}, \{c_{ij}\})$  технологічних обмежень, в якому позначено:  $c_i$  – обмеження за тиском та температурою для об'єктів типу вершина;  $c_{ij}$  – обмеження для об'єктів типу ребро. Для вершин типу відбір (споживач) та джерело характерними є такі обмеження –  $Q_i^+ \in [Q_{i\min}^+, Q_{i\max}^+]$ ,  $Q_j^- \in [Q_{j\min}^-, Q_{j\max}^-]$ ,  $T_r \in (0, T_{r\max}]$ . Основні обмеження для ребер типу: ділянка газопроводу  $(i, j)$  –  $P_{i\max}, T_{i\max}$ ; компресорний цех –  $Q_{\min}^n d \leq Q_i \leq Q_{\max}^n$ ,  $h_{\min} \leq h(Q_i)$ ,  $K_z \leq K_z(\frac{\%}{n}, Q_1) \leq K_{z\max}$ ,  $n_{\min}^n \leq \frac{\%}{n} \leq n_{\max}^n$ ,  $P_{\min} \leq P_j \leq P_{\max}$ ,  $T_j \leq T_{\max}$ , де  $i$  – вершина входу; а  $j$  – вершина виходу КС;  $d$  – коефіцієнт віддаленості від помпажної зони відцентрового нагнітача (ВН);  $\frac{\%}{n}$  – приведені оберти;  $K_z$  – коефіцієнт завантаження ГПА. Обмеження для кожного ГПА на: положення робочих точок на характеристиках ВН, для забезпечення безпомпажної роботи ГПА; максимальну об'ємну продуктивність ВН, частоту обертання вала ВН ( $n_{\min} \leq n \leq n_{\max}$ ); максимальну потужність газотурбінної установки ГПА; максимальний вихідний тиск ВН, який визначається міцністю трубопроводів на виході ВН; максимальну температуру на виході ВН, мінімальне значення тиску на виході кожного ВН; умови, пов'язані із заданим ступенем стійкості роботи ГПА (віддаленість від межі нестійкості); умови узгодженості схеми з'єднання ВН з підвідними і відвідними шлейфами та магістральними газопроводами.

Введемо ще вектор термодинамічного стану об'єктів  $\bar{s}(\{i, j\})$ . Основними параметрами термодинамічного стану є: для ділянки газопроводу –  $(I_{ek}, K_T)_{ij}, (i, j) \in M$ ; для запірної арматури –  $(z)_{ij}, (i, j) \in L$ ; для компресорної станції –  $(h_{ps}, K_s)_{ij}, (i, j) \in K$ , де  $I_{ek}$  – еквівалентний гідравлічний опір;  $K_T$  – коефіцієнт теплопровідності газ-зовнішнє середовище;  $z$  – сумарний коефіцієнт гідравлічного опору;  $h_{ps}$  – політропічне ККД ВН  $s$ -го ГПА,  $K_s$  – ККД приводу  $s$ -го ГПА.

Можливі і додаткові умови на точність дотримування балансу газу в системі. Якщо дисбаланс у системі (сумарні надходження газу в систему не дорівнюють сумарним відборам газу із системи) є більшим за допустимий, то потрібно задати спосіб його ліквідації. Ця проблема постійно виникає і часто пов'язана з неповнотою бази заміряних даних. У системі можливі керування. І тому природно ввести  $\bar{u}(\{u_{ij}\}) \in U$  – вектор керування. Компонентами такого вектора  $u_{ij}$  (можлива зміна стану  $(i, j)$  об'єкта) можуть бути: зміна стану запірної арматури (відкрито, закрито); зміна обертів нагнітачів на ГПА, зміна кількості ГПА, зміна потужності ГПА; зміна параметрів газу в вершинах його надходження і відборів. Визначивши вектори технологічних обмежень, термогідравлічного стану об'єкта та керування, можна ввести вектор  $\bar{r}(\bar{u}, \bar{c}, \bar{s}) \in R$  режимів, де  $r_{ij}$  – стан  $(i, j)$ -го об'єкта. Найпростіше виконати ідентифікацію, якщо характер руху газу, із заданою точністю, можна вважати стаціонарним. Зазначимо, що практично всі задачі ідентифікації є оберненими і некоректними задачами.

### Постановка задачі

**Дано:** на інтервалі часу  $[t_0, t]$  відомі: частота вимірювання даних; граф-схема ГТС, моделі технологічних об'єктів; множина вершин, в яких вимірюється один із (можливо, набір параметрів газу) параметрів газу  $(P, Q^-, Q^+, T, r, T_r, \{m_i\})$ ; множина ребер  $\{(i, j)\}$ , для яких відома витрата газу  $q_{ij}$ ; підмножина множини запірної арматури, для яких є відомим їхній стан; перелік параметрів ідентифікації (це можуть бути параметри, які інтерпретуються як фізичні величини, а також відповідні еквіваленти, наприклад, гідравлічні) для всіх об'єктів ГТС; баланс газу в системі і в деяких його підсистемах.

**Знайти:** відсутню інформацію про стан запірної арматури; параметри ідентифікації (параметри термогідравлічного стану технологічних об'єктів).

**Якщо виконуються умови** (для всіх заміряних даних, за винятком незначної кількості, яка встановлюється в процесі розв'язання задачі ідентифікації):

$-|P_i - P_z| \leq e_1, |T_i - T_z| \leq e_2, |q_{ij} - q_{jz}| \leq e_3$  на всьому інтервалі часу  $[t_0, t]$ , де індексом  $z$  позначено заміряні дані.

Інтервал часу вимірювання даних повинен бути достатнім, щоб забезпечити необхідну точність ідентифікації та розв'язування задач планування режимів ГТС. Щоб дослідити вплив температури зовнішнього середовища на температурний режим руху газу, мінімальний інтервал часу повинен становити не менше ніж рік. Важливо, щоб на цьому часовому інтервалі множина різних топологій граф-схем режимів була максимально близькою до повної.

Вважатимемо, що в граф-мережі транспортування газу є відсутніми паралельні дуги і петлі. Сформулюємо необхідні умови розв'язності задачі ідентифікації параметрів стану трубопроводів за умов ізотермічності потоків газу. Параметрами моделі ГТС вважають:  $n$  притоків,  $n$  вузлових параметрів (тисків),  $m$  потоків по дугах і коефіцієнтів гідравлічних опорів. Сумарна кількість параметрів дорівнює  $2(n + m)$ , причому  $\sum_{i=1}^n Q_i = 0$ . В усталеному режимі руху газу завжди виконуються  $n - 1$  рівняння балансу (7) і  $m$  рівнянь  $j_{ij}$ . Припустимо, що притоки і тиски вимірюються в  $n_Q$  і  $n_p$  вершинах. Отже, задача ідентифікації буде розв'язною за умов  $n_Q + n_p \geq m + n$ . Із співвідношення між кількістю дуг  $m$ , кількістю вершин  $n$  і кількістю незалежних контурів  $r$  у графі  $n = m + 1 - r$  одержимо, що  $n_Q + n_p \geq 2m - r + 1$  і  $n_Q + n_p \leq 2n - 1 = 2m - 2r + 1$ . У випадку відсутності контурів  $r = 0$  отримаємо, що  $n_Q = n - 1$  і  $n_p = n$ . Це означає, що при однократному вимірюванні задача ідентифікації режиму може бути розв'язна тільки за умов; мережа не має контурів, тиски вимірюються у всіх вершинах і відомі притоки у всіх вершинах.

Вказані умови майже ніколи не виконуються, тому для ідентифікації потрібно вводити додаткові умови. Сформулюємо їх:

– величини  $I_{ij}$  рівні між собою (можна показати, що в цьому випадку потрібно тиски заміряти в двох вершинах мережі);

– величини  $I_{ij}$  є різними для різних ниток газопроводів і зберігають своє значення на нитці (у такому разі для знаходження  $I_{ij}$  потрібно використати інформацію про декілька режимів роботи мережі).

Кількість таких режимів повинна задовольняти умову  $b \geq \frac{m}{n_Q + n_p - n}$ . Якщо до того ж  $n_Q + n_p > n$ , то виконується необхідна умова розв'язності задачі ідентифікації. Якщо тиск

вимірюється у всіх вершинах і хоча би в одній вершині є притік, тоді  $b \geq \frac{m}{n_Q}$ . За умов  $n_Q + n_p \leq n$

задача ідентифікації не має розв'язку незалежно від того, скільки режимів розглянуто.

### Результати числових експериментів

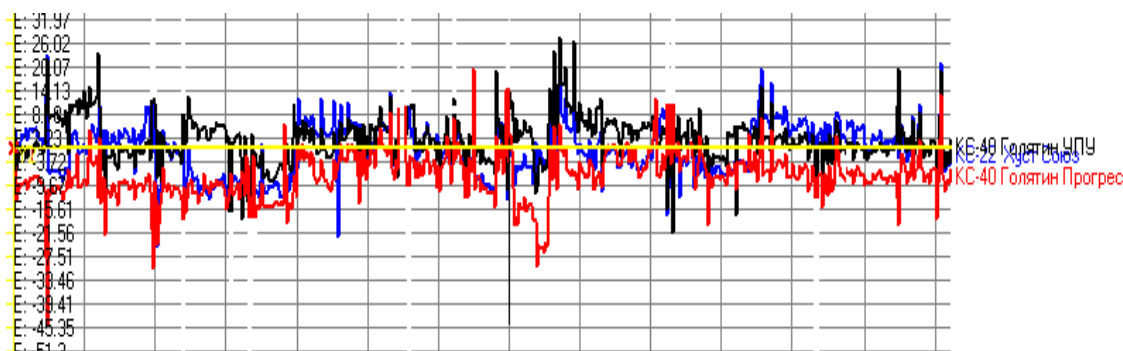


Рис. 1. Результати ідентифікації параметрів моделей для трьох газопроводів одночасно. Відхилення заміряних від розрахованих змінюється в контрольованих вершинах за тисками в межах 0.7 атмосфер впродовж року

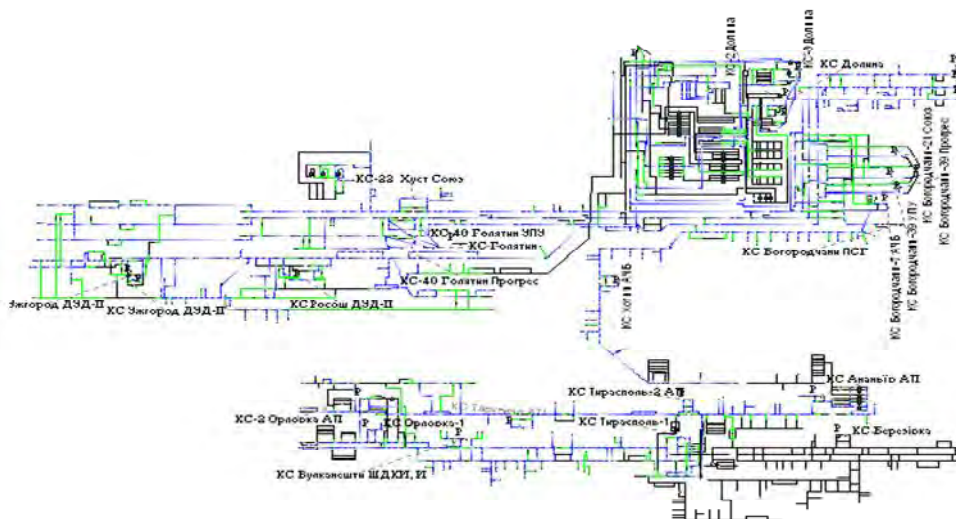


Рис.2. Фрагмент технологічної схеми УМГ „Прикарпаттрансгаз”, на якій ідентифіковано параметри математичної моделі системи транспортування газу

### Висновки

Для ідентифікації параметрів моделей необхідно максимально зменшити параметричну та структурну невизначеності системи. Процеси ідентифікації параметрів моделей та ліквідації

невизначеностей системи здійснюються одночасно. Поки що повністю автоматизувати процес ідентифікації параметрів моделі в умовах невизначеності не вдається, оскільки поставлені задачі є, в основному, некоректними. Для розв'язування поставлених задач розроблено засоби візуального порівняльного аналізу даних у довільній вершині (наборах вершин) технологічної схеми ГТС.

1. Сиперштейн Б.И. Идентифицируемость сложных газопроводных систем. – М., 1986. 20 с. Деп. во ВНИИЭгазпроме, № 987 гз. 2. Хаймер Ю., Яковлев Е.И. Метод оценки параметров сложной трубопроводной сети // И.М.Губкина, 1979. – Вып. 141. – С. 74 – 80. 3. Сиперштейн Б.И. Параметрическая идентификация сложных газопроводных систем // Электронное моделирование, 1986, № 1. – С. 77–92. 4. Гамм А.З. Статистический метод оценивания состояния электро-энергетических систем. – М.: Наука, 1976. – 220 с. 5. Притула Н. М. Розрахунок параметрів потокорозподілу газу в газотранспортній системі (стаціонарний випадок) // Фізико-математичне моделювання та інформаційні технології. – 2007. – Вип. 5. – С. 146–155. 6. Гладун С., Притула Н., Землянський Б., Химко О. Розрахунок гідродинамічних параметрів стану об'єктів транспорту газу // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”: Комп'ютерні науки та інформаційні технології. – Львів, 2008. – № 629. – С. 92–99.

УДК 630.181

С. Стрямець, В. Наконечний

Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра автоматизованих систем управління

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ СУКЦЕСІЙНИХ ПРОЦЕСІВ ЛІСОВОГО ФІТОЦЕНОЗУ

© Стрямець С., Наконечний В., 2011

Наведено опис програмного продукту, який може здійснювати моделювання приросту, зміни просторової структури, складу лісостану залежно від зміни едафічних та екологічних факторів на окремій ділянці.

Описано функції програмного продукту для керування лісовими ресурсами: розроблення довгострокової стратегії формування високопродуктивних деревостанів, планування рубок догляду, головного користування, прогнозування обсягів лісозаготівлі. Програмний продукт розроблено для точного та швидкого розрахунку таксаційних показників лісостану.

**Ключові слова:** математичне моделювання, прогнозування сукцесійних процесів, фітоценоз, таксаційні показники.

The description of the software, which can carry out simulation of growth, changes in spatial structure of stands depending on changes in edaphic and environmental factors on a given site, is described.

The functions of the software allow to manage forest resources such as: long-term strategy of managing the stands structure, thinning, cleaning, and make forecast of logging volumes of timber. The software is designed for accurate and precisely calculation of the forest inventory parameters of the stands.

**Keywords:** Mathematical modeling, forecasting succession processes, phytocoenosis, forest valuation indicators.

### Вступ

Моделювання є одним з важливих напрямів досліджень у лісовій науці. Внаслідок бурхливого розвитку обчислювальної техніки та відповідних розділів математики зростає інтерес до