УДК 681.5

Ю. М. Паночишин, асп.

ОПТИМІЗАЦІЯ КОНТРОЛЮ В СИСТЕМАХ УПРАВЛІННЯ ІНЖЕНЕРНИМИ МЕРЕЖАМИ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ

Постановка проблеми

Існує клас територіально розподілених систем, відомих під назвою інженерних мереж, основним функційним призначенням яких є забезпечення споживачів деяким цільовим продуктом (теплом, водою, електроенергією та ін.). До цього класу відносять різноманітні трубопровідні системи (газо-, водо-, теплопостачання), а також вентиляційні та електричні мережі. Оптимальне функціонування таких об'єктів передбачає дотримання строгої відповідності між кількістю виробленого цільового продукту та потребами споживачів у ньому та ефективний розподіл потоків цільового продукту між споживачами. Поточні потреби споживачів безперервно змінюються, а це, в свою чергу, вимагає оперативного перерозподілу потоків в мережах відповідно до ситуації. Розв'язання такої технічної задачі в більшості інженерних мереж здійснюється шляхом автоматизованого управління процесами потокорозподілу на основі аналізу поточного стану потокорозподілу та прогнозу майбутніх обсягів споживання цільового продукту.

Потокорозподіл в інженерних мережах теплопостачання (ІМТ), які розглядаються в роботі, визначається витратою, тиском та температурою теплоносія. В автоматизованих системах управління ІМТ інформація про ці параметри надходить телевимірювальними каналами від сенсорів, встановлених на мережах. В переважній більшості ІМТ параметри потокорозподілу вимірюються лише в окремих контрольних точках. Це пов'язано, насамперед, з великою кількістю елементів, що формують структуру ІМТ, а також технічною складністю та високою вартістю встановлення великої кількості контрольно-вимірювальної апаратури і побудови системи зв'язку. Як наслідок, значна частина необхідної інформації втрачається, що в результаті призводить до похибок під час реалізації алгоритмів управління, а іноді і до аварійних ситуацій. Тому актуальною є задача оптимізації кількості контрольно-вимірювальної апаратури (оптимізації контролю) в системах управління ІМТ.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Аналіз наукових досліджень та публікацій в цьому напрямку, в яких започатковано розв'язання проблеми, дозволив виявити спільний підхід до розв'язання задачі оптимізації контролю. Всі автори відзначають недоцільність вимірювання всієї сукупності параметрів потокорозподілу, а зменшення кількості вимірювань пропонують здійснювати за рахунок додаткового залучення рівнянь математичної моделі потокорозподілу в ІМТ, яка зв'язує окремі вимірювані параметри. На основі цих рівнянь можна розрахувати невимірювані параметри, виявити та усунути чи зменшити похибки вимірювань.

При цьому в залежності від того, які конкретно параметри виступають в ролі відомих (виміряних) і невідомих (шуканих), можливі різноманітні математичні постановки задачі визначення параметрів потокорозподілу та способи її розв'язання. Класичною в даній області є задача розрахунку потокорозподілу в електричних та гідравлічних мережах, де на основі відомих параметрів за допомогою законів Ома та Кірхгофа з заданою структурою електричного чи гідравлічного кола визначають всі інші параметри потокорозподілу. Однак розрахунок потокорозподілу видається можливим лише завдяки спеціальному підбору комбінацій вхідних і вихідних даних задачі. У праці [1] автори розглядають задачу з довільними комбінаціями вимірюваних та невідомих параметрів та пропонують власний підхід до її розв'язання. В [2] запропонований метод, який дозволяє скоротити кількість вимірюваних параметрів за рахунок багатократних вимірювань тиску у вузлах ІМТ припускаючи, що гідравлічний опір трубопроводів за час вимірювань не змінюється.

Наступним кроком в даній області стали праці [3–5], в яких автори, використовуючи методи статистичного оцінювання, розв'язують задачу визначення параметрів потокорозподілу в стохастичній формі (в припущенні, що виміряні дані включають похибку). У статті [6] розглядається «метод приведеної лінеаризації», який дозволяє оцінити як виміряні, так і невідомі параметри потокорозподілу з довільним набором вимірюваних параметрів, а також враховує апріорну інформацію про статистичні характеристики вимірювань та шуканих оцінок.

У всіх розглянутих працях автори відзначають, що розв'язання задачі визначення параметрів потокорозподілу за вимірюваннями як в детермінованій (без врахування похибок), так і стохастичній постановці (з врахуванням похибок), можливе лише при певному складі вимірювань. Однак на практиці далеко не кожен склад вимірювань може бути забезпечений внаслідок технічних і вартісних обмежень на встановлення вимірювальної апаратури.

У зв'язку з цим виникла ідея поряд з даними вимірювань залучати додаткову інформацію про потокорозподіл в ІМТ. Джерелом такої інформації можуть бути експертні оцінки та досвід експлуатації конкретних ІМТ.

Метою даної роботи є розроблення методу, який дозволив би знайти оптимальний склад вимірювань, що забезпечує розв'язання задачі визначення стану потокорозподілу.

Як відомо з [7], взаємозв'язок між основними параметрами потокорозподілу в замкнених дволінійних закритих ІМТ описується математичною моделлю сталого потокорозподілу. В загальному випадку цю модель можна представити системою рівнянь вигляду

$$\mathbf{F}(\mathbf{Z}) = \mathbf{F}(\mathbf{X},\mathbf{Y}) = 0\,, \tag{1}$$

де $\mathbf{Z}$ — повний вектор параметрів потокорозподілу розмірністю s; $\mathbf{X}$ — вектор невідомих (невимірюваних) параметрів розмірністю n; $\mathbf{Y}$ — вектор відомих (вимірюваних) параметрів розмірністю m; $\mathbf{F}$ — деякий нелінійний функціонал розмірністю r; $\mathbf{Z} = \mathbf{X} \cup \mathbf{Y}$ і $n + m = s$.

Вектор вимірюваних параметрів $\mathbf{Y}$ неминуче включає невизначеність внаслідок похибок та неодночасності вимірювань, шумів в каналах зв'язку, можливих відмов інформаційно-вимірювальної апаратури та інших факторів:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{Y}_\partial + \varepsilon_Y\,, \tag{2}$$

де $\mathbf{Y}_\partial$ — вектор дійсних значень вимірюваних параметрів; ε_Y — вектор похибок вимірювань.

Якщо $\varepsilon_Y = 0$ (детермінована постановка), то отримуємо звичайну задачу розрахунку потокорозподілу, розв'язання якої зводиться до визначення вектора невідомих параметрів $\mathbf{X}$ на основі рівнянь математичної моделі (1). При цьому система рівнянь (1) матиме однозначний розв'язок за умови [8]

$$\operatorname{rank}\frac{\partial \mathbf{F}(\mathbf{X},\mathbf{Y})}{\partial \mathbf{X}} = n \qquad \text{або} \quad \left|\frac{\partial \mathbf{F}(\mathbf{X},\mathbf{Y})}{\partial \mathbf{X}}\right| \neq 0\,, \tag{3}$$

де $\partial\mathbf{F}/\partial\mathbf{X}$ — матриця Якобі в точці $\mathbf{X}^*$, коли $\mathbf{F}(\mathbf{X}^*,\mathbf{Y}) = 0$.

В стохастичній постановці допускається, що $\varepsilon_Y \neq 0$. У зв'язку з цим вектор невідомих параметрів $\mathbf{X}$ неможливо визначити, його можна лише оцінити, а задача визначення поточного стану потокорозподілу в даному випадку називається задачею ідентифікації або оцінювання [3, 6, 9]. Найчастіше допускають, що похибки вимірювань вектора ε_Y розподілені за нормальним законом з відомими значеннями дисперсій ε_Y^2, а задачу оцінювання зводять до такої

$$\min_{\widehat{Y}} \sum_{j=1}^{m} \frac{(Y_j - \widehat{Y}_j)^2}{\sigma_{Yj}^2}\,, \tag{4}$$

з обмеженнями

$$\mathbf{F}(\widehat{\mathbf{Z}}) = \mathbf{F}(\widehat{\mathbf{X}},\widehat{\mathbf{Y}}) = 0, \qquad (5)$$

де $\widehat{\mathbf{Z}}$ — повний вектор оцінок параметрів; $\widehat{\mathbf{X}}$, $\widehat{\mathbf{Y}}$ — відповідно вектори оцінок невідомих та оцінок виміряних параметрів потокорозподілу; як і раніше $\widehat{\mathbf{Z}} = \widehat{\mathbf{X}} \cup \widehat{\mathbf{Y}}$. Тобто процедура оцінювання полягає в пошуку таких значень параметрів потокорозподілу (оцінок $\widehat{\mathbf{X}}$ і $\widehat{\mathbf{Y}}$), які задовольняють рівнянням математичної моделі сталого потокорозподілу і є найближчими в сенсі деякого критерію до виміряних значень $\mathbf{Y}$. Розв'язання задачі оцінювання відомими методами дозволяє визначити вектори оцінок $\widehat{\mathbf{X}}$ і $\widehat{\mathbf{Y}}$, а також дисперсії отриманих оцінок $\hat{\sigma}_X^2$ і $\hat{\sigma}_Y^2$, які характеризують точність отриманого рішення. Як і для детермінованої постановки, задача оцінювання матиме однозначний розв'язок за виконання умови (3).

За якість вимірювання в даній роботі будемо розуміти деяку скалярну величину

$$R = \frac{1}{\sum\limits_{i=1}^{s} r_i \frac{\hat{\sigma}_{Zi}}{Z_i}}, \qquad (6)$$

де r_i — штраф за неточність оцінки параметра Z_i $(r_i \ge 0)$. Якість вимірювання R залежить як від похибок вимірювань σ_Y, так і від кількості m та складу параметрів вектора $\mathbf{Y}$ (рис. 1). В загальному випадку чим більша кількість вимірюваних параметрів m, тим вища якість вимірювань R. Найвища якість досягається, якщо $m = s$, що відповідає вимірюванню всіх параметрів потокорозподілу. Точка $m_б$ на рис. 1 відповідає мінімальній кількості вимірюваних параметрів, тоді виконується умова (3) і задача визначення стану потокорозподілу має однозначний розв'язок. Такий склад вимірюваних параметрів прийнято називати базисним [9]. Позначимо базисний склад вимірюваних параметрів як $\mathbf{Y}_б$, а всі інші вимірювані параметри як $\mathbf{Y}_н$ $(\mathbf{Y}_н = \mathbf{Y} \setminus \mathbf{Y}_б)$. Виключення будь-якого вимірювання з базисного складу вимірюваних параметрів $\mathbf{Y}_б$ призводить до різкого зменшення якості вимірювання, навіть під час вимірювання всіх параметрів вектора $\mathbf{Y}_н$.

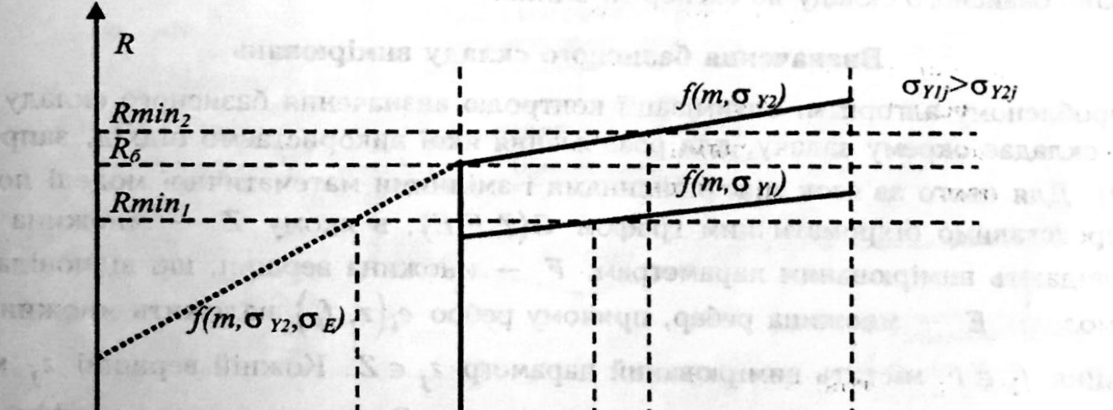


Рис. 1. Якісний графік залежності якості вимірювання R від кількості вимірюваних параметрів m

В системах управління ІМТ існує однозначний зв'язок між якістю вимірювання та якістю керування, тому для забезпечення необхідної якості керування потрібно забезпечити необхідний рівень якості вимірювання R, а відповідно кількість m і склад вектора вимірюваних параметрів $\mathbf{Y}$. Так, якщо якість вимірювання задана на рівні $R_{\min_1}$, то необхідна кількість вимірюваних параметрів складає m_1 з похибкою вимірювань σ_{Y1}, і m_6 – якщо похибка вимірювань σ_{Y2}. Якщо ж необхідна якість вимірювання задана на рівні $R_{\min_2}$, то з похибкою вимірюваних параметрів σ_{Y1} необхідна кількість та склад вимірювань взагалі не може бути забезпечений.

Ефективним способом зменшення вимог до метрологічної забезпеченості системи управління ІМТ є залучення експертної інформації. Для обґрунтування правильності цього твердження звернемося до рис. 1. Якщо значення похибок вимірювань σ_{Y2}, то рівень якості вимірювання $R_{\min_1}$ забезпечується базисним складом вимірювань $\mathbf{Y}_6$, а мінімальна кількість вимірюваних параметрів складає m_6. Замінимо вимірювання деякого параметра Z_i, який входить до базисного складу $\mathbf{Y}_6$, на експертну оцінку. Для цього нечітке дане, що виражає експертну оцінку, шляхом відповідного нормування перетворимо в стохастичну форму. Обчисливши значення дисперсії експертно оціненого параметра та розв'язавши задачу оцінювання, отримаємо $\hat{\mathbf{Z}}$ і $\hat{\sigma}_Z$, для яких розрахуємо R. Отримане значення R буде меншим R_6, однак його достатньо для забезпечення необхідного рівня якості вимірювання $R_{\min_1}$. Таким чином, поступово замінюючи вимірювання базисного складу $\mathbf{Y}_6$ на експертні оцінки, отримаємо оптимальне співвідношення вимірювань та експертних оцінок.

Алгоритм оптимізації контролю

На основі запропонованого методу оптимізації складу вимірюваних параметрів розроблено алгоритм (рис. 2), який починаючи зі складу, що містить всі можливі вимірювання, послідовно по одному виключає вимірювання з найбільшими похибками. Це дозволяє порівняти отриманий рівень якості вимірювання з заданим обмеженням $R_{\min}$. Якщо в процесі роботи алгоритму виявиться, що рівень якості вимірювання, який забезпечується базисним складом $\mathbf{Y}_6$, вищий заданого рівня $R_{\min}$, то проводиться послідовна заміна вимірювань базисного складу на експертні оцінки.

Визначення базисного складу вимірювань

В розробленому алгоритмі оптимізації контролю визначення базисного складу вимірювань $\mathbf{Y}_6$ складає окрему задачу, для розв'язання якої використаємо підхід, запропонований в [9]. Для цього зв'язок між рівняннями і змінними математичної моделі потокорозподілу представимо біхроматичним графом $G(Z,F,E)$, в якому Z – множина вершин, що відповідають вимірюваним параметрам; F – множина вершин, що відповідають рівнянням моделі; E – множина ребер, причому ребро $e_i(z_j,f_k)$ належить множині E, якщо рівняння $f_k \in F$ містить вимірюваний параметр $z_j \in Z$. Кожній вершині z_j множини Z поставимо у відповідність вагові коефіцієнти w_j. Значення вагових коефіцієнтів визначаються експертним шляхом і вказують на доцільність прямого вимірювання того чи іншого параметра, причому чим менша доцільність вимірювання деякого параметра, тим більший його ваговий коефіцієнт. Якщо прийняти, що вагові коефіцієнти ребер $e_i(z_j,f_k)$ відповідають ваговим коефіцієнтам інцидентних їм вершин z_j, то задачу визначення базисного складу вимірюваних параметрів Y_6 можна звести до задачі побудови найбільшого паросполучення максимальної ваги на графі $G(Z,F,E)$ [9].

Аналіз побудованого паросполучення полягає в такому. Якщо в результаті роботи алгоритму виявиться, що вершина z_j не належить паросполученню, то відповідний параметр має бути виміряним. Якщо вершина z_j є вершиною паросполучення, то вимірювання не потрібне, а відповідний параметр може бути визначений з системи рівнянь математичної моделі.

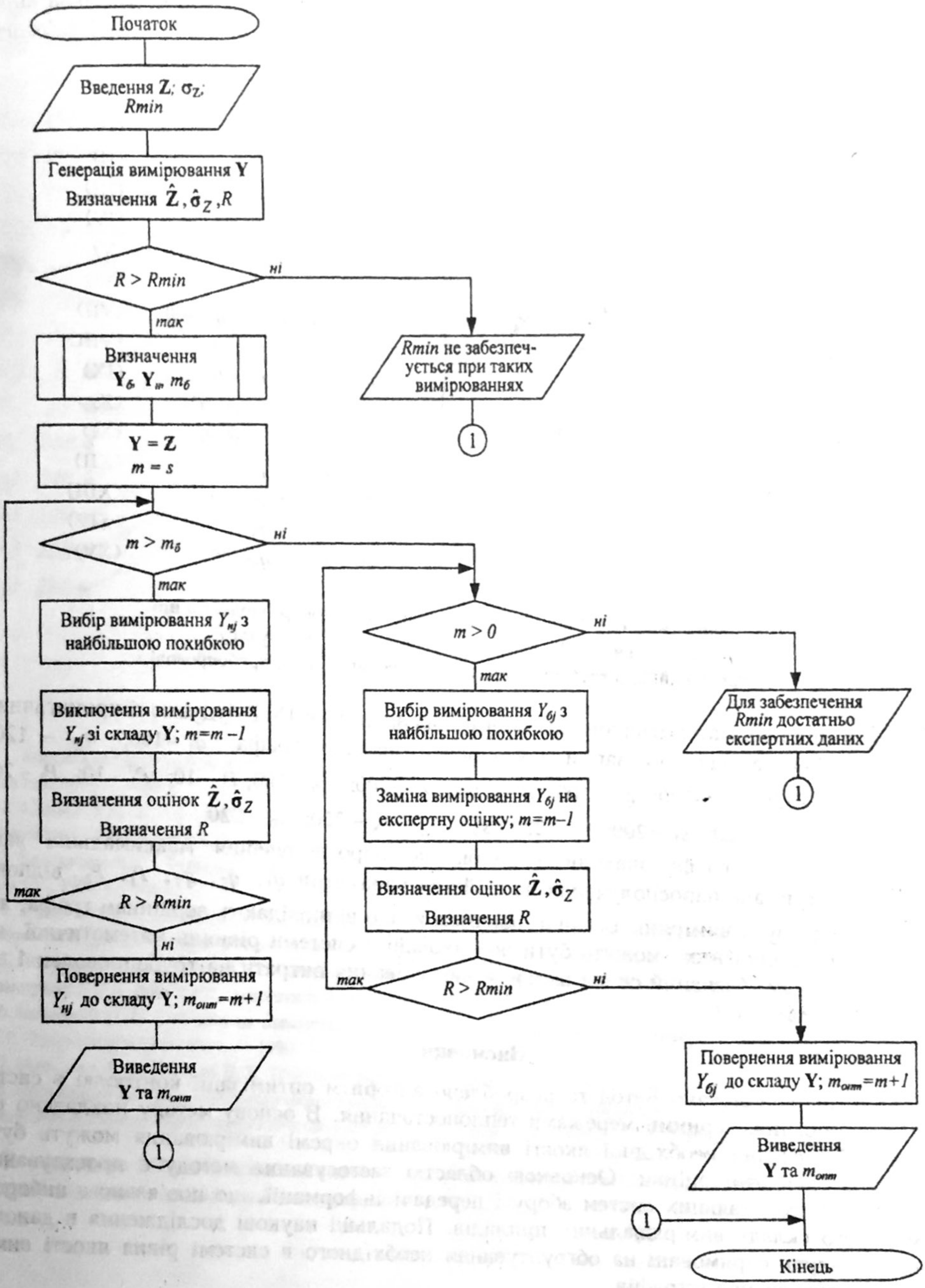
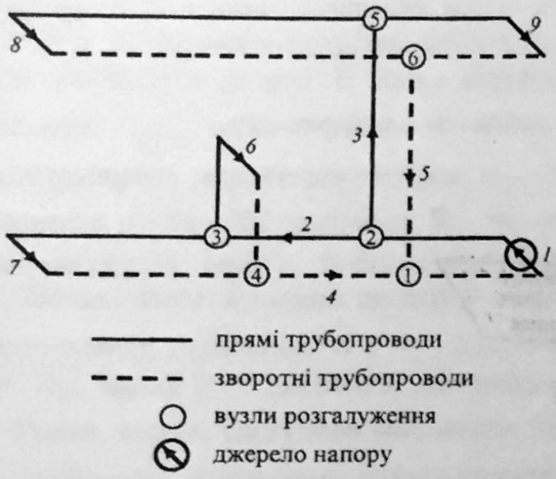


Рис. 2. Структурна схема алгоритму оптимізації контролю

Приклад визначення базисного складу вимірювань

Маємо деяку умовну ІМТ та математичну модель потокорозподілу в ній (рис. 3). Коефіцієнти гідравлічних опорів s_2, s_3, s_4, s_5 і значення напору H_1 задані як апріорно відомі, відповідно вони входять у рівняння математичної моделі як константи. Загальна кількість параметрів — 20, загальна кількість рівнянь математичної моделі — 15. Необхідно сформувати базисний склад вимірюваних параметрів.



$$
\begin{cases}
-q_1 - q_4 + q_5 = 0 & \text{(I)}\\
-q_1 + q_2 + q_3 = 0 & \text{(II)}\\
-q_2 + q_6 + q_7 = 0 & \text{(III)}\\
q_4 - q_6 - q_7 = 0 & \text{(IV)}\\
-q_3 + q_8 + q_9 = 0 & \text{(V)}\\
q_5 - q_8 - q_9 = 0 & \text{(VI)}\\
P_1 - P_2 + H_1 - s_1 q_1^2 = 0 & \text{(VII)}\\
P_2 - P_3 - s_2 q_2^2 = 0 & \text{(VIII)}\\
P_2 - P_5 - s_3 q_3^2 = 0 & \text{(IX)}\\
-P_1 + P_4 - s_4 q_4^2 = 0 & \text{(X)}\\
-P_1 + P_6 - s_5 q_5^2 = 0 & \text{(XI)}\\
P_3 - P_4 - s_6 q_6^2 = 0 & \text{(XII)}\\
P_3 - P_4 - s_7 q_7^2 = 0 & \text{(XIII)}\\
P_5 - P_6 - s_8 q_8^2 = 0 & \text{(XIV)}\\
P_5 - P_6 - s_9 q_9^2 = 0 & \text{(XV)}
\end{cases}
$$

Рис. 3. Схема умовної ІМТ та математична модель потокорозподілу в ній: q_i — потік (витрата) у трубопроводі i; P_j — тиск у вузлі j; s_i — гідравлічний опір трубопроводу i; H_i — діючий напір у трубопроводі i

На основі рівнянь математичної моделі потокорозподілу в ІМТ будуємо біхроматичний граф (рис. 4а) та задаємо вагові коефіцієнти вершин графа: q_1 –100; q_2 – 120; q_3 – 120; q_4 –120; q_5 –120; q_6 –100; q_7 –100; q_8 –100; q_9 –100; P_1 –10; P_2 –10; P_3 – 20; P_4 – 20; P_5 – 20; P_6 – 20; s_1 – 200; s_6 – 220; s_7 – 220; s_8 – 220; s_9 – 220.

У побудованому графі знаходимо найбільше паросполучення максимальної ваги (рис. 4б). В отримане паросполучення не ввійшли параметри q_1, q_6, q_7, P_1, P_2, відповідно вони мають бути виміряні. Всі інші параметри, що відповідають вершинам графа, які належать паросполученню, можуть бути розраховані з системи рівнянь математичної моделі. Таким чином, базисний склад включає вимірювання витрати на трубопроводах 1, 6, 7 і тиску у вузлах 1 і 2.

Висновки

В роботі запропоновано метод та розроблено алгоритм оптимізації контролю в системах управління інженерними мережами теплопостачання. В основу методу покладено те, що для забезпечення необхідної якості вимірювання окремі вимірювання можуть бути замінені на експертні оцінки. Основною областю застосування методу є проектування нових та розвиток наявних систем збору і передачі інформації, що пов'язано з вибором оптимального складу вимірювальних приладів. Подальші наукові дослідження в даному напрямку будуть спрямовані на обґрунтування необхідного в системі рівня якості вимірювання та визначення штрафів.

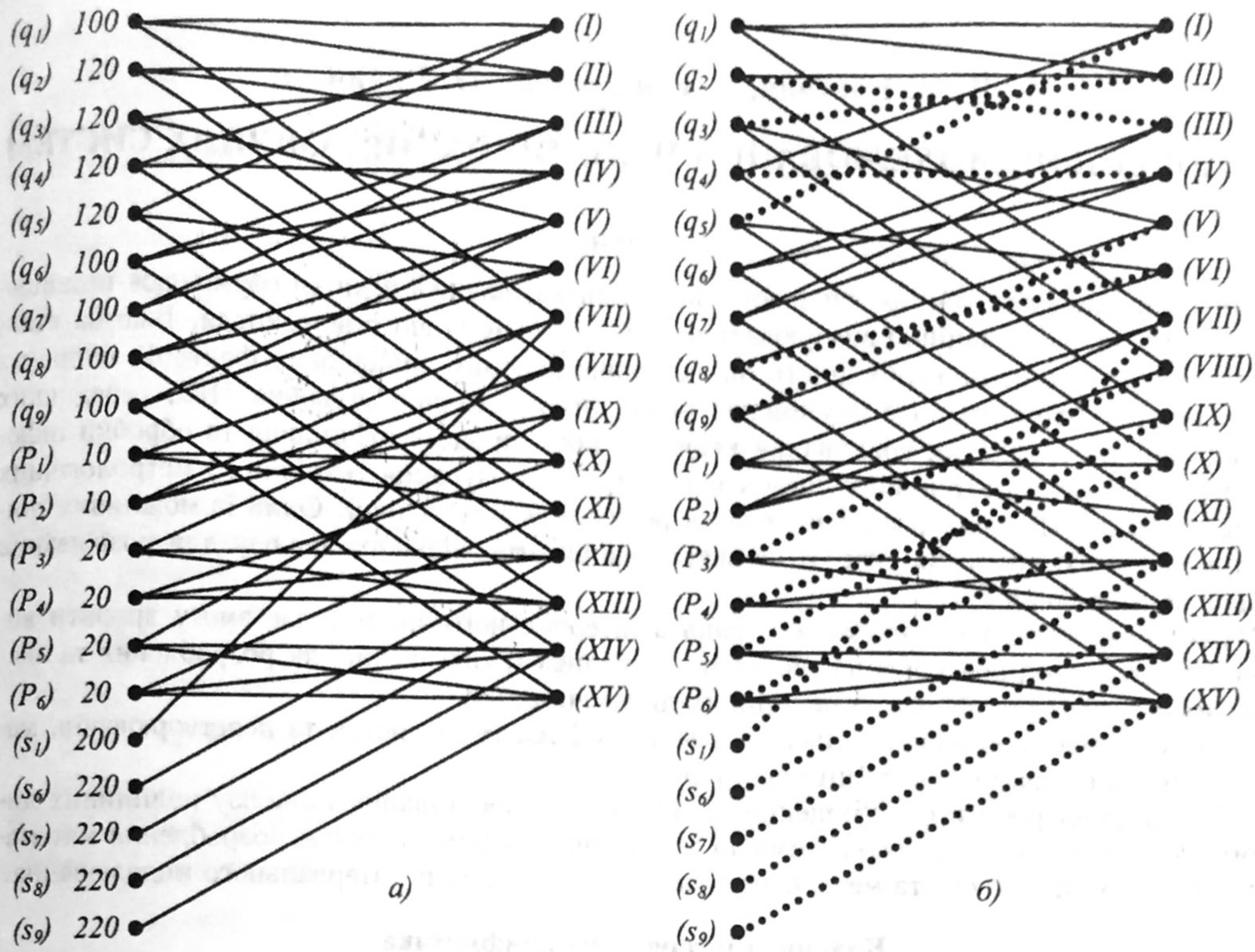


Рис. 4. Біхроматичний граф (а) і найбільше паросполучення (б)

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Минимизация функций и ее приложения к задачам автоматизированного управления инженерными сетями. — Х.: Вища шк., 1985. — 288 с.
2. Меренков А. П., Светлов К. С., Сидлер В. Г., Хасилев В. Я. Математический расходомер и его применение в тепловых сетях // Теплоэнергетика. — 1971. — № 1 — С. 70—72.
3. Евдокимов А. Г., Тевяшев А. Д. Оперативное управление потокораспределением в инженерных сетях. — Харьков: Вища шк., 1980. — 144 с.
4. Евдокимов А. Г., Федоров Н. В., Козыренко С. И. Повышение эффективности решения задачи идентификации состояния потокораспределения в инженерных сетях // Электронное моделирование. — 1988. — № 6. — С. 77—81.
5. Новицкий Н. Н. Сидлер В. Г. Идентификация трубопроводных систем как гидравлических цепей с переменными параметрами // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. — 1984 — № 4. — С. 155—162.
6. Новицкий Н. Н. Оценивание параметров трубопроводных систем методом приведенной линеаризации // Изв. Ан СССР. Энергетика и транспорт. — 1990. — № 6. — С. 122—129.
7. Меренков А. П. Хасилев В. Я. Теория гидравлических цепей. — М.: Наука, 1985. — 278 с.
8. Справочник по теории автоматического управления / Под ред. А. А. Красовского. — М.: Наука, 1987. — 712 с.
9. Наблюдаемость электроэнергетических систем / А. З. Гамм, И. И. Голуб. — М.: Наука, 1990. — 200 с.

Паночишин Юрій Миколайович — аспірант кафедри комп'ютерних систем управління

Вінницький національний технічний університет