

В.М.Назаренко докт. техн. наук, професор,
М.В. Назаренко, канд. техн. наук
(Україна, Кривий Ріг, Криворізький технічний університет)

СИСТЕМА КЕРУВАННЯ БАГАТОЗВ'ЯЗНИМ ВИРОБНИЧИМ ПРОЦЕСОМ НА ОСНОВІ КОРЕЛЯЦІЙНОЇ МОДЕЛІ ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ

Теорія багатозв'язних систем [1, 2] розглядає різні види прямих та зворотних зв'язків. Як відомо, можна розрізнити два види багатовимірних процесів. Найбільш простий багатовимірний об'єкт характеризується відсутністю, або достатньо слабким взаємним впливом вихідних параметрів. В цьому випадку більш менш чітко можна відокремити вхідні та вихідні параметри. Збагачувальні технології як об'єкти керування відрізняються досить значними внутрішніми технологічними зворотними зв'язками. Тому вони повинні розглядатися як багатозв'язні системи.

У роботах [1-4] засновників теорії багатозв'язних систем керування, які стали класичними, досліджуються системи, в яких взаємний вплив вихідних величин одна на одну здійснюється, головним чином через зворотні зв'язки не технологічного походження. Це зворотні зв'язки через систему керування, яка включає також регулятор. У цих роботах значна увага надається проблемі автономізації керування окремими вихідними змінними без одночасного впливу на інші змінні. На жаль, в технологічних процесах можуть існувати зворотні зв'язки не через систему керування, а через окремі технологічні ланцюги. Це ускладнює застосування класичних прийомів автономізації керування за окремими каналами. Крім того, для створення будь-якої системи керування необхідно спочатку одержати модель об'єкта керування. Вирішення цього питання методами активного експерименту практично неможливе. Одержання моделі аналітичними методами вимагає врахування сукупності багатьох факторів, які майже не піддаються аналітичному опису. Тим часом фактор випадковості відіграє велику роль, особливо якщо це стосується процесів у видобувних та збагачувальних технологіях.

Розглянемо можливість одержання моделей багатозв'язних систем та керуючих дій з метою одержання високоякісних перехідних процесів.

Структурна схема такого багатозв'язного об'єкта зображена на рис. 1, де зв'язки між вхідними та вихідними величинами показані через зворотний зв'язок та регулятор. Прямі зв'язки між вхідними та вихідними змінними не показані, оскільки вони існують завжди. Переривчастими лініями показані також безпосередні зв'язки між вихідними змінними.

Ці технологічні зв'язки, не залежать від структури зворотних зв'язків та структури регулятора. Розглянемо декілька прикладів. Відсотковий вміст заліза в концентраті та у хвостах такий, що збільшення одного з них призводить до зменшення іншого. Відсотковий вміст заліза в концентраті та об'єм

виробництва концентрату зв'язані між собою технологічно. Те ж саме можна сказати і від-

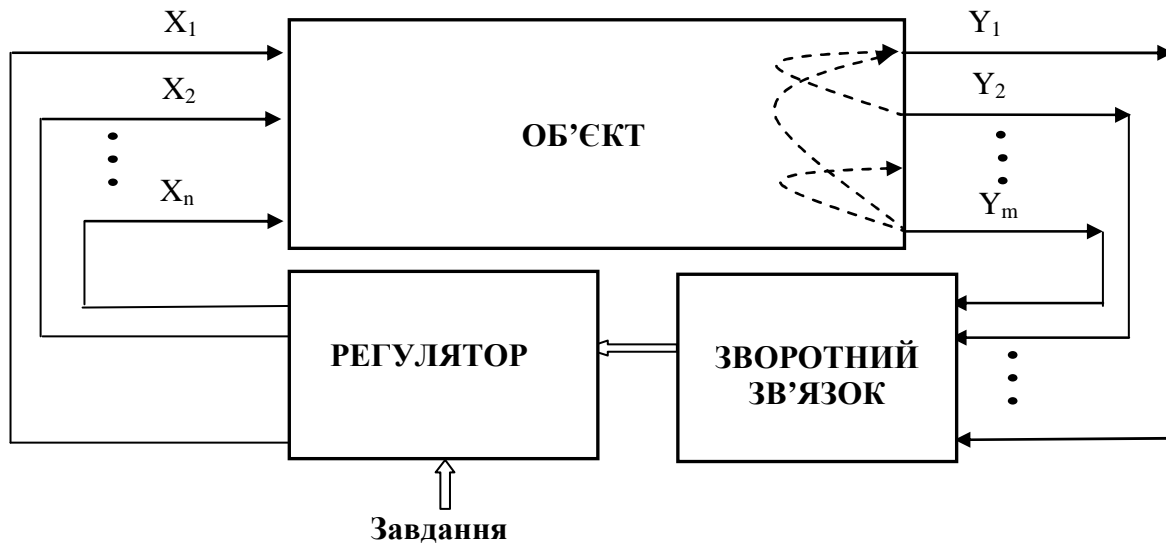


Рис. 1. Структурна схема багатозв'язної системи

носно вмісту різних класів. У цьому випадку не можна довільно керувати окремими вихідними величинами. Їх можна виключити з моделі, наприклад, залишивши лише вміст заліза. Коли залежність майже точно функціональна між вихідними величинами, то це припустимо. Виключити вміст деяких класів неможливо через відсутність відомої функціональної залежності між ними. Неврахування цих змінних може призвести до втрати точності моделі. На думку авторів багатозв'язні системи керування процесами збагачення не піддаються повній автономізації.

Для спрощення, не втрачаючи загальності результатів, будемо враховувати обмежену кількість вхідних та вихідних параметрів. Розподілимо моделі на статичні, які представлені у вигляді лінійних алгебраїчних рівнянь, та динамічні, які представлені у вигляді кореляційних співвідношень, передаточних функцій або різницевих рівнянь. Розглянемо окремо вказані два випадки.

Ця модель заснована на одержанні кореляційних функцій, а з них різницевих рівнянь. Така модель є динамічною, бо вона враховує зв'язок між значеннями вхідних та вихідних параметрів на кількох інтервалах дискретності. При цьому зауваження, які були зроблені щодо логічних та фізичних змінних, зберігають своє значення і в даному разі. Спочатку розглянемо об'єкт з одним входом та одним виходом. На базі отриманих таким чином співвідношень перейдемо до багатозв'язної системи.

Передаточна функція об'єкта керування може бути представлена у дискретному часі як [5]

$$W(z) = \frac{R_{xy}(z)}{R_{xx}(z)},$$

де z – символ дискретного перетворення за Лапласом; $R_{xy}(z)$, $R_{xx}(z)$ – відповідно, зображення взаємної кореляційної функції (вхід – вихід об'єкта

керування) та автокореляційної функції вхідного сигналу.

Розрахунок керуючої дії виконується не на всій траєкторії руху об'єкта керування, а на кожному інтервалі дискретності окремо, достатньо використати лише кілька перших значень кореляційних функцій. Таким чином, зображення кореляційних функцій у дискретному часі має вигляд:

$$\begin{aligned} R_{xy}(z) &= R_{xy}(0)z^0 + R_{xy}(1)z^{-1} + R_{xy}(2)z^{-2}, \\ R_{xx}(z) &= R_{xx}(0)z^1 + R_{xx}(1)z^0 + R_{xx}(2)z^{-1}, \end{aligned}$$

де $R_{xy}(z)$ та $R_{xx}(z)$ відповідно значення взаємо та автокореляційних функцій у відповідні моменти часу n .

Передаточна функція записується так:

$$W(z) = \frac{R_{xy}(z)}{R_{xx}(z)} = \frac{R_{xy}(0)z^0 + R_{xy}(1)z^{-1}}{R_{xx}(0)z^1 + R_{xx}(1)z^0} = \frac{y(z)}{x(z)},$$

де $Y(z)$ – z -зображення вихідної функції; $X(z)$ – z -зображення вхідної функції (керуючої дії).

Після перетворень маємо

$$y[j+1] = \frac{1}{R_{xx}(0)} (R_{xy}(0)x[j] + R_{xy}(2)x[j-2] - R_{xx}(1)y[j]).$$

У загальному виді

$$y[i+1] = \frac{1}{R_{xx}(0)} \sum_{j=0}^{i-2} R_{xy}(i+j)x[i-j] - \frac{1}{R_{xx}(0)} \sum_{j=0}^{i-1} R_{xx}(i+j+1)y[i-j]. \quad (1)$$

Очевидно, що коефіцієнти моделі утворені із значень кореляційних функцій.

Аналогічно можна одержати значення однієї з вихідних змінних багатозв'язної моделі з трьома вхідними та трьома вихідними змінними:

$$\begin{aligned} Y_1(z) &= \frac{Ry_1y_1(z)}{zRy_1y_1(z)} y_1(z) + \frac{Ry_1y_2(z)}{zRy_2y_2(z)} y_2(z) + \frac{Ry_1y_3(z)}{zRy_3y_3(z)} y_3(z) + \\ &\quad \frac{Rx_1y_1(z)}{zRx_1x_1(z)} x_1(z) + \frac{Rx_2y_1(z)}{zRx_2x_2(z)} x_2(z) + \frac{Rx_3y_1(z)}{zRx_3x_3(z)} x_3(z), \\ Y_2(z) &= \frac{Ry_1y_2(z)}{zRy_1y_1(z)} y_1(z) + \frac{Ry_2y_2(z)}{zRy_2y_2(z)} y_2(z) + \frac{Ry_2y_3(z)}{zRy_3y_3(z)} y_3(z) + \\ &\quad \frac{Rx_1y_2(z)}{zRx_1x_1(z)} x_1(z) + \frac{Rx_2y_2(z)}{zRx_2x_2(z)} x_2(z) + \frac{Rx_3y_2(z)}{zRx_3x_3(z)} x_3(z). \\ Y_3(z) &= \frac{Ry_3y_1(z)}{zRy_1y_1(z)} y_1(z) + \frac{Ry_3y_2(z)}{zRy_2y_2(z)} y_2(z) + \frac{Ry_3y_3(z)}{zRy_3y_3(z)} y_3(z) + \\ &\quad + \frac{Rx_1y_3(z)}{zRx_1x_1(z)} x_1(z) + \frac{Rx_2y_3(z)}{zRx_2x_2(z)} x_2(z) + \frac{Rx_3y_3(z)}{zRx_3x_3(z)} x_3(z), \end{aligned} \quad (2)$$

де $Ry_{i;y_j}(z)$ або $Rx_{i;y_j}(z)$ - Z - зображення, відповідно, автокореляційних та взаємкореляційних функцій.

Відношення кореляційних функцій у кожному з доданків не що інше, як передаточні функції впливу відповідної вхідної змінної на вихідну. Наприклад,

$$\frac{Ry_{3;y_1}(z)}{zRy_{1;y_1}(z)} = W_{31}^y(z)$$

– передаточна функція по каналу „ третій вихід - перший вихід”. Причому верхній індекс означає, що як вхідна функція виступає одна із вихідних, у даному випадку y_1 , яка впливає на третій вихід. Однак для спрощення запису прийнято угоду: номер біля верхнього індексу не дублюється, він відповідає другому нижньому індексу.

Аналогічно

$$\frac{Rx_{2;y_1}(z)}{zRx_{2;x_2}(z)} = W_{12}^x(z).$$

Верхній індекс на цей раз означає, що як вхідна функція виступає одна із вхідних, у даному випадку x_2 , яка впливає на перший вихід. Однак для спрощення запису прийнято попередню угоду.

У прийнятих позначеннях систему рівнянь (2) можна представити так:

$$\begin{aligned} Y_1(z) &= W_{11}^y(z)y_1(z) + W_{12}^y(z)y_2(z) + W_{13}^y(z)y_3(z) + \\ &\quad W_{11}^x(z)x_1(z) + W_{12}^x(z)x_2(z) + W_{13}^x(z)x_3(z), \\ Y_2(z) &= W_{21}^y(z)y_1(z) + W_{22}^y(z)y_2(z) + W_{23}^y(z)y_3(z) + \\ &\quad W_{21}^x(z)x_1(z) + W_{22}^x(z)x_2(z) + W_{23}^x(z)x_3(z), \\ Y_3(z) &= W_{31}^y(z)y_1(z) + W_{32}^y(z)y_2(z) + W_{33}^y(z)y_3(z) + \\ &\quad + W_{31}^x(z)x_1(z) + W_{32}^x(z)x_2(z) + W_{33}^x(z)x_3(z). \end{aligned}$$

Для першого виразу з системи (2) одержимо за аналогією з (1), враховуючи лише по три значення кореляційних функцій, різницеве рівняння

$$\begin{aligned}
y_1[i+1] = & \frac{1}{R_{y_1 y_1}(0)} \sum_{j=0}^{j=2} R_{y_1 y_1}(i+j) y_1[i-j] + \frac{1}{R_{y_2 y_2}(0)} \sum_{j=0}^{j=2} R_{y_1 y_2}(i+j) y_2[i-j] + \\
& + \frac{1}{R_{y_3 y_3}(0)} \sum_{j=0}^{j=2} R_{y_1 y_3}(i+j) y_3[i-j] - \frac{1}{R_{y_1 y_1}(0)} \sum_{j=0}^{j=1} R_{y_1 y_1}(i+j+1) y_1[i-j] - \\
& - \frac{1}{R_{y_2 y_2}(0)} \sum_{j=0}^{j=1} R_{y_1 y_2}(i+j+1) y_2[i-j] - \frac{1}{R_{y_3 y_3}(0)} \sum_{j=0}^{j=1} R_{y_1 y_3}(i+j+1) y_3[i-j] + \\
& + \frac{1}{R_{x_1 x_1}(0)} \sum_{j=0}^{j=2} R_{y_1 x_1}(i+j) x_1[i-j] + \frac{1}{R_{x_2 x_2}(0)} \sum_{j=0}^{j=2} R_{y_1 x_2}(i+j) x_2[i-j] + \\
& + \frac{1}{R_{x_3 x_3}(0)} \sum_{j=0}^{j=2} R_{y_1 x_3}(i+j) x_3[i-j] - \frac{1}{R_{x_1 x_1}(0)} \sum_{j=0}^{j=1} R_{y_1 x_1}(i+j+1) x_1[i-j] - \\
& - \frac{1}{R_{x_2 x_2}(0)} \sum_{j=0}^{j=1} R_{y_1 x_2}(i+j+1) x_2[i-j] - \frac{1}{R_{x_3 x_3}(0)} \sum_{j=0}^{j=1} R_{y_1 x_3}(i+j+1) x_3[i-j]
\end{aligned}$$

Аналогічно для інших змінних:

$$\begin{aligned}
y_2[i+1] = & \frac{1}{R_{y_2 y_2}(0)} \sum_{j=0}^{j=2} R_{y_2 y_2}(i+j) y_2[i-j] + \frac{1}{R_{y_1 y_1}(0)} \sum_{j=0}^{j=2} R_{y_2 y_1}(i+j) y_1[i-j] + \\
& + \frac{1}{R_{y_3 y_3}(0)} \sum_{j=0}^{j=2} R_{y_2 y_3}(i+j) y_3[i-j] - \frac{1}{R_{y_1 y_1}(0)} \sum_{j=0}^{j=1} R_{y_2 y_1}(i+j+1) y_1[i-j] - \\
& - \frac{1}{R_{y_2 y_2}(0)} \sum_{j=0}^{j=1} R_{y_2 y_2}(i+j+1) y_2[i-j] - \frac{1}{R_{y_3 y_3}(0)} \sum_{j=0}^{j=1} R_{y_2 y_3}(i+j+1) y_3[i-j] + \\
& + \frac{1}{R_{x_1 x_1}(0)} \sum_{j=0}^{j=2} R_{y_2 x_1}(i+j) x_1[i-j] + \frac{1}{R_{x_2 x_2}(0)} \sum_{j=0}^{j=2} R_{y_2 x_2}(i+j) x_2[i-j] + \\
& + \frac{1}{R_{x_3 x_3}(0)} \sum_{j=0}^{j=2} R_{y_2 x_3}(i+j) x_3[i-j] - \frac{1}{R_{x_1 x_1}(0)} \sum_{j=0}^{j=1} R_{y_2 x_1}(i+j+1) x_1[i-j] - \\
& - \frac{1}{R_{x_2 x_2}(0)} \sum_{j=0}^{j=1} R_{y_2 x_2}(i+j+1) x_2[i-j] - \frac{1}{R_{x_3 x_3}(0)} \sum_{j=0}^{j=1} R_{y_2 x_3}(i+j+1) x_3[i-j], \\
y_3[i+1] = & \frac{1}{R_{y_3 y_3}(0)} \sum_{j=0}^{j=2} R_{y_3 y_3}(i+j) y_3[i-j] + \frac{1}{R_{y_2 y_2}(0)} \sum_{j=0}^{j=2} R_{y_3 y_2}(i+j) y_2[i-j] +
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{1}{R_{y_3 y_3}(0)} \sum_{j=0}^{j=2} R_{y_3 y_3}(i+j)y_3[i-j] - \frac{1}{R_{y_1 y_1}(0)} \sum_{j=0}^{j=1} R_{y_3 y_1}(i+j+1)y_1[i-j] - \\
& - \frac{1}{R_{y_2 y_2}(0)} \sum_{j=0}^{j=1} R_{y_3 y_2}(i+j+1)y_2[i-j] - \frac{1}{R_{y_3 y_3}(0)} \sum_{j=0}^{j=1} R_{y_3 y_3}(i+j+1)y_3[i-j] + \\
& + \frac{1}{R_{x_1 x_1}(0)} \sum_{j=0}^{j=2} R_{y_3 x_1}(i+j)x_1[i-j] + \frac{1}{R_{x_2 x_2}(0)} \sum_{j=0}^{j=2} R_{y_3 x_2}(i+j)x_2[i-j] + \\
& + \frac{1}{R_{x_3 x_3}(0)} \sum_{j=0}^{j=2} R_{y_3 x_3}(i+j)x_3[i-j] - \frac{1}{R_{x_1 x_1}(0)} \sum_{j=0}^{j=1} R_{y_3 x_1}(i+j+1)x_1[i-j] - \\
& - \frac{1}{R_{x_2 x_2}(0)} \sum_{j=0}^{j=1} R_{y_3 x_2}(i+j+1)x_2[i-j] - \frac{1}{R_{x_3 x_3}(0)} \sum_{j=0}^{j=1} R_{y_3 x_3}(i+j+1)x_3[i-j],
\end{aligned}$$

де $i = (0, 1, 2, \dots)$ – поточний номер точки на i -му інтервалі процесу; j – номер точки на графіку кореляційної функції.

У загальному виді останні співвідношення можуть бути записані з використанням матриць, які складаються з однакових за структурою доданків:

$$\begin{aligned}
M_1 &= \frac{1}{R_{yy}(0)} \sum_{j=0}^{j=K} R_{yy}(i+j); & M_2 &= \frac{1}{R_{yy}(0)} \sum_{j=0}^{j=K-1} R_{yy}(i+j+1); \\
M_3 &= \frac{1}{R_{xx}(0)} \sum_{j=0}^{j=K} R_{yx}(i+j); & M_4 &= \frac{1}{R_{xx}(0)} \sum_{j=0}^{j=K-1} R_{yx}(i+j+1),
\end{aligned}$$

де k – кількість точок графіків кореляційних функцій, які враховано при одержанні передаточної функції.

Обчислені значення кореляційних функцій розглядаються, наприклад, у випадку одновимірного об'єкта, як початкові значення коефіцієнтів моделі. Після цього їх необхідно оптимізувати за критерієм мінімуму помилки прогнозу.

Був проведений числовий експеримент для визначення коефіцієнтів моделі процесу переробки сировини з урахуванням 20-ти технологічних параметрів, які розглядалися як вхідні змінні. Вихідною змінною була якість концентрату, визначена у відсотках вмісту заліза.

Результати перевірки наведеної методики на багатовимірній моделі відображені на рис.2. З бази даних, накопичених у результаті реєстрації технологічних параметрів процесу переробки сировини, була одержана багатозв'язна кореляційна модель. На її 19 входів подавалися значення вхідних технологічних параметрів, взятих з тієї ж бази, але в різні періоди часу, відмінні від періодів, за які будувалася

кореляційна модель.

Результати розрахунків порівнювалися з відповідними даними з бази. Фактично було змодельовано прогноз вихідного технологічного параметра. Тонка лінія на цьому рисунку – графік помилки прогнозу, жирна – лінія тренду. Прогноз був розрахований на протязі 30-ти змін. Максимальна помилка прогнозу становить близько 6%. Середнє значення помилки складає 2.01%.

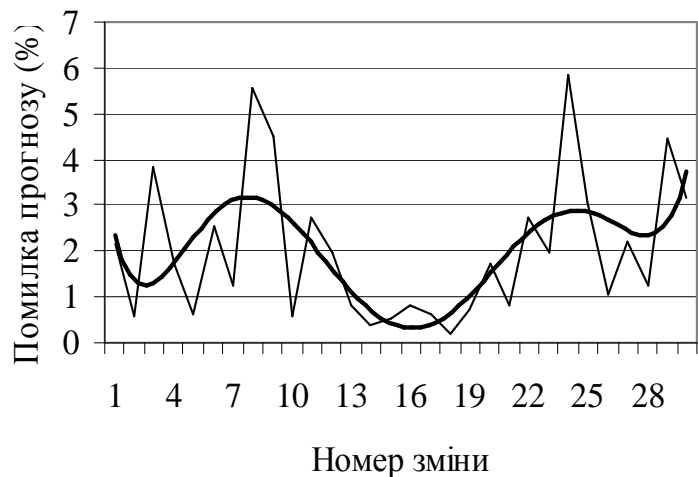


Рис. 2. Абсолютна помилка прогнозу якості концентрату з урахуванням всіх технологічних параметрів.

Подальша перевірка методики повинна бути проведена на діючому обладнанні.

Висновки:

1. Кореляційна модель багатозв'язної системи, одержана з урахуванням обмеженої кількості значень кореляційних функцій, виправдала себе.
2. За допомогою запропонованої методики можна отримати математичні моделі як окремих цехів, обладнання, так і всього комбінату.

Список літератури

1. Мееров М.В. Системы многосвязного регулирования. -М.: Недра, 1966.- 384 с.
2. Морозовский В.Т. Многосвязные системы автоматического регулирования. - М.: Энергия, 1970.- 288 с.
3. Вознесенский И.Н., О регулировании машин с большим числом регулируемых параметров. // Автоматика и телемеханика.- 1938.- №4-5.
4. Voksenbom A.S., Hood R., General algebraic method applied to control analysis of complex engine types, NASA Tesh /Rept., 980, 1950.
5. Марюта А.Н., Качан Ю.Г., Бунько В.А. Автоматическое управление технологическими процессами обогатительных фабрик: Учебник для вузов. -М.: Недра, 1983. - 277 с.