

УДК 681.513.6

А.С. КУЗЬМЕНКО, старший викладач, М.Л. БАРАНОВСЬКА, канд. техн. наук, доц.,
Г.В. КОЛОМІЦ, асистент, Криворізький національний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМ З ЗАПІЗНЮВАННЯМИ ДЛЯ ПОДАЛЬШОЇ КОМПЕНСАЦІЇ ЇХ ВПЛИВУ НА ЗАМКНУТІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ

Мета. Метою даної роботи є виконання аналізу проблеми регулювання в системах автоматичного управління, що містять протяжні транспортні лінії, які викликають запізнювання. Аналіз проведено на прикладі ідентифікації даного об'єкта з запізнюванням для подальшої настройки типового промислового регулятора. Результатом даного дослідження є отримання порівняльних характеристик, а не абсолютних значень, і оцінка якості регулювання процесу з використанням даного методу та представлених типів промислових регуляторів.

Методи. При виконанні теоретичних досліджень прийнято метод математичного моделювання об'єктів регулювання другого порядку. Розроблено і вдосконалено математичні моделі об'єктів регулювання та ґрунтовано основні і малозначимі параметри, що впливають на їх роботу.

Наукова новизна. Докладно вивчено питання теорії управління складними об'єктами, зроблено висновки та наведено практичні рекомендації по вибору систем регулювання об'єктів з чистим запізнюванням.

Практична значимість. Інтерес до систем управління з запізнюванням завжди був і залишається на досить високому рівні. Цей факт пояснюється рядом причин. Більшість виробничих процесів мають запізнювання, вплив яких на динамічні властивості системи дуже великий. Ряд об'єктів має приховані запізнювання, які в порівнянні з швидкодією процесів на об'єкті не великі. Такими запізнюваннями найчастіше нехтують. Але в ряді випадків вони є важливою властивістю об'єкта, яка вимагає її врахування при аналізі динамічних властивостей об'єкта.

Результати. Для деяких процесів динамічні характеристики об'єкта мають такі властивості, що найкращий (відносно якості перехідних процесів) спосіб регулювання буде неекономічним, тому в майже статичному режимі регулююча дія має бути або відсутньою, або мати мінімальне можливе значення. Проте у ряді випадків економічна доцільність отримання навіть невеликого приросту критерію якості може бути основою для використання складних систем управління, особливо для складних об'єктів з запізнюванням.

Ключові слова: регулювання, запізнювання, ідентифікація об'єкта, налаштування регулятора, вибір способу регулювання.

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Питання систем управління з запізнюваннями є актуальним. Це пояснюється рядом причин. Системи управління виробничими процесами мають запізнювання, які значно впливають на динамічні властивості систем. Приховані запізнювання, в порівнянні зі швидкодією процесів, не великі, тому ними часто нехтують. У ряді випадків при аналізі динамічних властивостей об'єкта запізнювання є його важливою складовою, яку необхідно враховувати. До таких об'єктів належать транспортні системи або об'єкти, побудовані за аналогічним принципом. У таких об'єктах запізнювання може проявлятися в двох видах: a - запізнювання по входу - запізнювання інформації про стан об'єкта, запізнювання по вимірюванню; b - запізнювання по виходу - запізнювання керуючого впливу на об'єкт, запізнювання з управління. Чим більше відношення величини запізнювання до найбільшої постійної часу об'єкта, тим складніше домогтися необхідної якості регулювання.

Аналіз досліджень і публікацій. Системам керування з запізнюванням присвячена велика кількість робіт. Перші проаналізовані публікації датовані 1974 роком, їх автор - Х.М. Гурецький [1]. З часом складність об'єктів регулювання та автоматичних систем регулювання зростала, з'являлися нові способи та методи регулювання, які розглянуті авторами А.А. Ашимовим, У. Рейем та В.Я. Ротачем у посібниках [2-4].

Постановка задачі. Провести теоретичні дослідження об'єктів регулювання з запізнюванням за основними відомими теоріями. В результаті даного дослідження отримати порівняльні характеристики і оцінити якості регулювання процесу з використанням різних відомих методів.

Викладення матеріалу та результати. Кожна система із запізнюванням має часові властивості, які можна наочно продемонструвати на прикладі аперіодичної ланки першого порядку із запізнюванням - τ , яке описується диференціально-різницевою рівнянням виду

$$T \frac{dy}{dt} + y = kx(t - \tau). \quad (1)$$

Позначимо $x'(t) = x(t - \tau)$, тоді рівняння (1) запишемо у вигляді

$$T \frac{dy}{dt} + y = kx'(t). \quad (2)$$

Отже, його перехідна характеристика відповідає аперіодичній ланці (рис. 1а), але затримана на τ с, що визначено затримкою дії $x'(t)$ (рис. 1б).

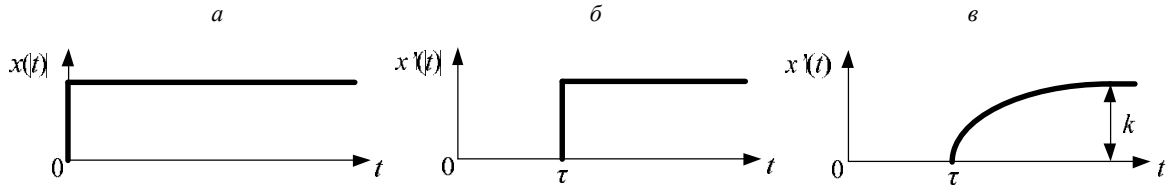


Рис.1. Перехідна характеристика аперіодичної ланки із запізнюванням

Отже, об'єкт з наявністю запізнювання характеризується наступними властивостями часової характеристики [1]:

часова характеристика будь-якої ланки із запізнюванням буде така ж, як у відповідної звичайної ланки, але тільки зрушена по осі часу вправо на величину запізнювання - τ ,

величину запізнювання τ в ланці можна визначити експериментально, шляхом зняття часової характеристики;

наявність ланки із запізнюванням не міняє значення модуля, а лише вносить додаткове фазове зрушення $(-\omega\tau)$.

В якості прикладу для розгляду впливу стійкості систем із запізнюванням можна привести замкнуту систему (рис. 2).

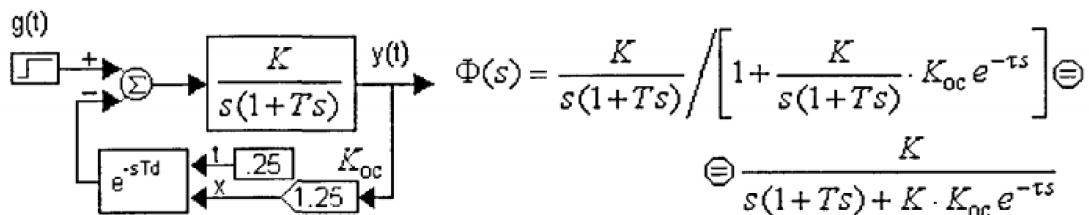


Рис. 2. Замкнута система з інтегруючою ланкою з уповільненням в якості об'єкту управління

Перехідна функція замкнутої системи і частотна характеристика матимуть вигляд

$$\Phi(s) = \frac{\frac{k}{S(1+Ts)}}{1 + \frac{k}{S(1+Ts)} \cdot k \cdot k_{33} e^{-Ts}} = \frac{k}{S(1+Ts) + k \cdot k_{33} e^{-Ts}} \quad (3)$$

$$\Phi(j\omega) = \frac{k}{-T\omega^2 + j\omega + k \cdot k_{33} (\cos(\omega\tau) - j \sin(\omega\tau))} = \frac{k}{(-T\omega^2 + k \cdot k_{33} (\cos(\omega\tau)) + j(\omega - k \cdot k_{33} \sin(\omega\tau)))} \quad (4)$$

По знаменнику перехідної функції видно, що характеристичне рівняння матиме множник e^{-Ts} , який визначає можливість наявності нескінченної кількості коренів (див. петлі годографа Михайлова $D(j\omega)$ (рис.3б)).

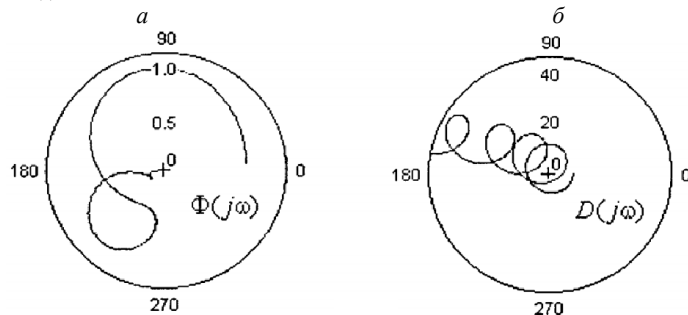


Рис. 3. а - годограф замкнутої системи ; б - годограф Михайлова $D(j\omega)$

Для стійкості усі вони повинні мати від'ємні дійсні частини. Отже, стійкість об'єктів за наявності запізнювання характеризується наступним:

- для стійкості систем 1-го і 2-го порядку із запізнюванням не досить додатніх коефіцієнтів;
- для систем 3-го і більше порядку не застосовуються критерії Вишнеградського, Гауса, Гурвіця.

Для визначення стійкості застосовано частотні критерії Михайлова і Найквіста, оскільки в них характеристичний вираз не розглядається в якості полінома.

Питанню регулювання об'єктів із запізнюванням присвячена значна кількість вітчизняних і зарубіжних робіт. Підвищений інтерес до проблеми регулювання об'єктів цілком виправданий, оскільки наявність в контурі регулювання чистого запізнювання істотно ускладнює завдання побудови ефективних САК. Із існуючих нині методів регулювання об'єктів із запізнюванням можна виділити наступні [2; 3]:

- типіві закони регулювання;
- імпульсне регулювання;
- каскадне і комбіноване регулювання;
- регулювання з попередженням;
- регулювання на основі продукційних правил нечіткої логіки.

Для багатовимірних систем з багатьма запізнюваннями завдання синтезу регулятора з компенсацією запізнювання істотно ускладнюється. Розглянемо багатовимірну систему, в якій залежність між m -мірним вектором управлінь $\mathbf{u}(s)$ і l -мірним вектором виходів $\mathbf{y}(s)$ задається передавальною матрицею $G(s)$

$$\mathbf{y}(s) = G(s) \cdot \mathbf{u}(s), \tag{5}$$

а залежність між $y(s)$ та n -мірним вектором збурень $\mathbf{d}(s)$ - за допомогою передавальної функції $G_d(s)$:

$$\mathbf{y}(s) = G_d(s) \cdot \mathbf{d}(s) + G(s) \cdot \mathbf{u}(s). \tag{6}$$

При цьому передавальні матриці мають вигляд

$$G(s) = \begin{bmatrix} g_{11} & \dots & g_{1m} \\ \dots & \dots & \dots \\ g_{n1} & \dots & g_{nm} \end{bmatrix}, \quad G_d(s) = \begin{bmatrix} g_{11}^d & \dots & g_{1k}^d \\ \dots & \dots & \dots \\ g_{n1}^d & \dots & g_{nk}^d \end{bmatrix}. \tag{7}$$

У багатьох практичних задачах, особливо, якщо передавальна функція відновлюється за результатами експериментів, $G(s)$ і $G_d(s)$ зазвичай мають простий вигляд.

Розглянемо систему регулювання, блок-схема якої показана на рис.4. Нехай G_c - передавальна функція регулятора, H - передавальна функція вимірювального пристрою, а $d(s)$ - уставка. Вихід замкнутої системи задається виразом

$$\mathbf{y}(s) = (I + G \cdot G_c(s) \cdot H)^{-1} \cdot (G \cdot G_c(s) \cdot \mathbf{y}_d(s) + G_d \cdot \mathbf{d}(s)). \tag{8}$$

При наявності запізнювань в системі вибір закону регулювання більш обмежений у порівнянні з системами без запізнювань. Тому оптимальною методикою синтезу регулятора буде наступна: спочатку будь-яким чином побудуємо блок компенсації запізнювання або прогнозатор, а потім скористаймося одним зі стандартних прийомів побудови САК. Блок компенсації можна будувати як в безперервній, так і в дискретній формі.

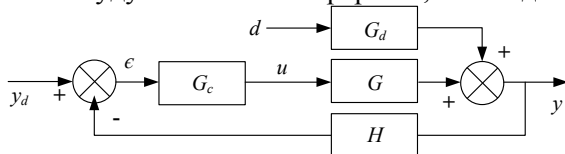


Рис.4. Блок-схема системи регулювання для багатовимірного об'єкта управління

Як було зазначено вище, є багато способів представлення систем з запізнюванням. Так, в разі лінійної системи з постійними запізнюваннями, вона має такий вид

$$x = \sum A_i x(t - \rho_i) + \sum B_i u(t - \beta_i) + \sum D_k d(t - \delta_k), \tag{9}$$

$$y = \sum C_i x(t - \gamma_i) + \sum E_i u(t - \varepsilon_i), \tag{10}$$

де x - n -мірний вектор станів; $\rho_i, \beta_i, \delta_k, \gamma_i, \varepsilon_i$ - постійні запізнювання.

Відповідне представлення в частотній області отримаємо, беручи перетворення Лапласа від (9) та (10)

$$y(s) = G_d(s) \cdot \bar{d}(s) + G(s) \cdot u(s), \quad (11)$$

де

$$G(s) = \sum E_j e^{-\alpha_j s} + \left[\left(\sum C_i e^{-\gamma_i s} \right) \left(sI - \sum A_i e^{-\rho_i s} \right)^{-1} \right] \left(\sum B_j e^{-\beta_j s} \right), \quad (12)$$

$$G_d(s) = \left[\left(\sum C_i e^{-\gamma_i s} \right) \left(sI - \sum A_i e^{-\rho_i s} \right)^{-1} \right] \left(\sum D_k e^{-\delta_k s} \right). \quad (13)$$

Відзначимо, що передавальні функції (12) та (13) мають набагато більш складний вид, ніж зазвичай буває в реальних задачах. Це характерно для тих, порівняно рідкісних на практиці випадків, коли модель об'єкта управління з самого початку задається у вигляді системи диференціальних рівнянь і немає необхідності відновлювати її за результатами експериментів.

Для багатовимірних систем з запізнюванням можна побудувати компенсатор, аналогічний прогнозатору Сміта [6,7], який приводить до того, що члени з запізнюванням в характеристичному рівнянні замкнутої системи зникають. Однак, на відміну від одновимірної задачі, де синтез компенсатора зводиться до прогнозу виходу на час запізнювання, в багатовимірному випадку компенсація пов'язана з прогнозом деяких «фіктивних» змінних стану в задані моменти часу. Структура багатовимірної системи з запізнюванням, охопленої зворотним зв'язком з компенсатором в контурі регулювання, зображена на рис.5.

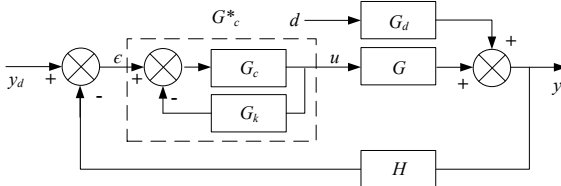


Рис. 5. Блок-схема системи регулювання з компенсатором запізнювань для багатовимірного об'єкта управління

Ця структура аналогічна розглянутому вище одновимірному випадку, тобто, власне, регулятору Сміта. Передавальну функцію компенсатора можна вибрати різними способами [10,11].

При

$$G_k = H^* G^* - H G \quad (14)$$

(де H^*, G^* - відповідні H та G передатні функції без запізньєнь) усувається запізнювання по виходах і запізнювання в характеристичному рівнянні замкнутої системи. Передавальна функція внутрішнього контуру G^* на схемі рис.5 має вигляд

$$u = G_c^* \bar{e} \quad \text{або} \quad G_c^* = (I + G_c G_k)^{-1} G_c. \quad (15)$$

Повна передавальна функція системи в цьому випадку задається виразом:

$$y = (I + G G_c^* H)^{-1} (G G_c^* \bar{y}_d + \bar{G}_d \bar{d}). \quad (16)$$

Багатовимірний компенсатор (13) дозволяє усунути запізнювання в характеристичному рівнянні замкнутої системи (15). Підстановка дає вираз

$$y = (I + G R^{-1} G_c H)^{-1} (G R^{-1} G_c \bar{y}_d + \bar{G}_d \bar{d}), \quad (17)$$

де $R = I + G_c (H^* G^* - H G)$; G - квадратна невироджена матриця.

Скориставшись теоремою про обернення матриць, отримаємо

$$(I + G R^{-1} G_c H)^{-1} = G (R + G_c H G)^{-1} R G^{-1}. \quad (18)$$

З виразу (16) випливає співвідношення $R + G_c H G = I + G_c H^* G^*$. Підставивши вирази для $(I + G R^{-1} G_c H)^{-1}$ та для $R + G_c H G$ в (18), знайдемо

$$y = G (I + G_c H^* G^*)^{-1} G_c \bar{y}_d + G (I + G_c H^* G^*)^{-1} R G^{-1} \bar{G}_d \bar{d}. \quad (19)$$

Стійкість замкнутої системи визначається коренями характеристичного рівняння

$$|I + G_c H^* G^*| = 0. \quad (20)$$

Як видно з (20), члени із запізнюваннями в характеристичному рівнянні відсутні, і, отже, запізнювання не впливають на стійкість замкнутої системи. Це вірно, однак, лише в тому випадку, коли модель керованого процесу абсолютно адекватна йому. На практиці, зазвичай, цього досягти не вдається та завжди залишається деяка неточність - помилка апроксимації об'єкта обраною моделлю, тому компенсація запізнювання не є повною, і при налаштуванні параметрів регулятора доводиться бути обережними [16,17].

Висновки та напрямок подальших досліджень. Якість регулювання в системі з компенсацією запізнювань виявляється значно вищою, ніж без неї. Тому ефективність типових законів регулювання недостатня, в зв'язку з чим, потрібне їх адаптивне налаштування [4; 5].

У ряді випадків позитивний ефект дає імпульсне регулювання. Значення інтегральних критеріїв якості досягаються приблизно такі ж, як і при безперервному регулюванні, що може служити засобом стабілізації.

Ефективність каскадного і комбінованого регулювання припускає, що є можливість виміру збурень, діючих на об'єкт, або, принаймні, можливість вибору менш інерційної контрольованої проміжної точки в об'єкті, інакше їх застосування невиправдане.

При одних і тих же параметрах налаштування регуляторів запас стійкості САК з регулятором Сміта вище, ніж звичайних САК. Це значить, що при однаковому запасі стійкості САК (наприклад, при одній і тій же мірі загасання перехідних процесів) для регулятора Сміта можна прийняти більший коефіцієнт посилення, що забезпечить кращу якість регулювання. До недоліків регулятора Сміта, окрім складності його структури і апаратної реалізації, відноситься висока чутливість до параметрів налаштування моделі. Помилки в налаштуванні моделі, викликані неточністю апріорних знань про характеристики об'єкту або нестационарних його властивостей, можуть привести не лише до погіршення якості перехідних процесів, але й до втрати стійкості системи керування.

Застосування нечітких алгоритмів регулювання не дає явних переваг перед класичними методами управління, а проблема стійкості в системі з нелінійним алгоритмом регулювання істотно ускладнюється.

Список літератури

1. **Гурецкий Х.** Анализ и синтез систем управления с запаздыванием. Пер. с польского. – М.: Машиностроение, 1974;
2. **Ашимов А.А.** Системы автоматического управления с изменяющейся конфигурацией для объектов с запаздыванием – Алматы: Галым, 1995г.-628с.;
3. **Рей У.** Методы управления технологическими процессами. Пер. с англ.-М. Мир. 1983 – 368С.;
4. **Ротач В.Я.** Автоматизация настройки систем управления. –М.: Энергоатомиздат. 1984;
5. **Ротач В.Я.** Теория автоматического управления тепловыделительными процессами. -М.: Энергоатомиздат, 1985 – 296С.;
6. Пат. 1270350/18-24 Способ компенсации запаздывания в системах автоматического регулирования / **А. Боровиков, А.П. Инешин, Г.В. Логинов**, Заявлено 13.10.1968: Опубликовано 04.11.1970. Бюллетень №7;
7. **Асанов А.З., Каримов В.С.** Синтез САУ для многосвязного объекта с запаздываниями на основе закона управления состоянием // Мехатроника, автоматизация, управление – 2008 - С.3336;
8. **Копысов О.Ю., Прокопов Б.И.** Построение алгоритма перестройки параметров и запаздывания в методе настраиваемой модели. М.: МГИЭМ, 1999;
9. **Осадчий С.И. Федотова М.А. Скрынник И.А.** Упредитель Сміта как средство компенсации запаздываний зерносушилки каскадного типа с кипящим слоем // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. – 2014. - №27;
10. **Осадчий С.И. Калита М.О. Скринник І.О.** Визначення структури і параметрів математичної моделі зерносушильної установки з кипящим шаром в реальних експлуатаційних умовах // Збірник наукових праць КНТУ.- Кіровоград: КНТУ, 2008 - С. 345-349;
11. **Азарсков В.Н. Блохин Л.Н. Житецкий Л.С.** Методология конструирования оптимальных систем стохастической стабилизации - Киев: Книжное издательство Национального авиационного университета, 2006 - 438 с.
12. **Асанов А.З. Каримов В.С.** Решение задачи синтеза системы автоматического управления многосвязным объектом с запаздываниями // Вестник УГАТУ, Управление. ВТИИ - Уфа: УГАТУ, 2009 - т.13, №2(35) - С.24-35;
13. **Щокін В.П., Щокіна О.В., Кузьменко А.С.** Метод параметричного синтезу асимптотично-стійких, інтелектуальних систем кування динамічними об'єктами // Матеріали VIII міжнародної науково-практичної конференції «Наука і освіта 2005».-Дніпропетровськ.-2005. - №63. – С. 80-81;
14. **Щокін В.П., Кузьменко А.С.,** Результати розробки алгоритму нечіткого логічного виводу ModifyMamdani // Вісник КТУ. – Кривий Ріг. -2007.- №17. – С.129-132;
15. **Кузьменко А.С., Коломіц Г.В., Сушенцев О.О.** Результати розробки методу еквівалентування функціональних особливостей fuzzy-контролерів // Автоматика. Автоматизация. Електротехнические комплексы и системы. – Херсон. -2008. - №1(21). –С.111-117;
16. **Кузьменко А.С., Щокін В.П.** Синтез нейронной сети для имитации и управления сложными объектами с распределенными во времени параметрами // Материали конеренции «Topical Issues of Rational Use of Natural Resources» April 20 – 22, 2011;
17. **Щокін В.П., Кузьменко А.С.** Компенсація запізнювання обекта керування в ARMABiS-системах // Матеріали конференції «Сталій розвиток промисловості та суспільства» - № 30 – 2012.

Рукопис подано до редакції 17.04.17