

В первом шаге тактовым импульсом запуска ИЗ-1 включается параллельный АЦП-3, на выходе которого будет получен промежуточный код, определяющий значение  $A_3$  в двоичном коде:

$$A_3 = Ent \left\lfloor \frac{U_x}{100} \right\rfloor = Ent \left\lfloor \frac{235}{100} \right\rfloor = 0010 = 2.$$

Во втором шаге после прихода тактового импульса ИЗ-2 с помощью параллельного АЦП-2 определяется двоичный код нескомпенсированной части преобразуемого напряжения  $U_x - A_3 \cdot 100 = 35$ , которая равна двоичному коду разрядного коэффициента  $A_2$ :

$$A_2 = Ent \left\lfloor \frac{U_x - A_3 \cdot 100}{10} \right\rfloor = Ent \left\lfloor \frac{35}{10} \right\rfloor = 0011 = 3.$$

Значение напряжения  $A_3 \cdot 100 = 200$  будет получено на выходе цифро-аналогового преобразователя ЦАП-3 путем включения на его вход двоичного кода коэффициента  $A_3 = 0010$ .

В третьем шаге на вход параллельного АЦП-1 поступает нескомпенсированная часть преобразуемого напряжения  $U_x - A_3 \cdot 100 - A_2 \cdot 10$ , в результате будет получен код коэффициента  $A_1$ :

$$A_1 = U_x - A_3 \cdot 100 - A_2 \cdot 10 = 235 - 200 - 30 = 0101 = 5.$$

Напряжение  $A_2 \cdot 10 = 30$  определяется аналогично предыдущему с помощью ЦАП-2.

Последовательность формирования кодов в процессе выполнения обобщенного алгоритма преобразования представим в следующем виде:

1 шаг	0010 0000 0000	} Промежуточные коды
	2 0 0	
2 шаг	0010 0011 0000	
	2 3 0	
3 шаг	0010 0011 0101	} Первичный код
	2 3 5	

Параллельно-последовательный преобразователь пригоден для цифрового преобразования напряжения, поэтому этот прибор следует включить в таблицу обобщенной классификации под номером 3.3.

#### Список литературы

1. Кончаловский В.Ю. Цифровые измерительные устройства / В.Ю. Кончаловский. — М.: Энергоатомиздат, 1985. — 300 с.
2. Аналого-цифровые преобразователи / Э.И. Гитис [и др.]. — М.: Энергоиздат, 1981. — 360 с.
3. Основы метрологии и электрические измерения / под ред. Е.М. Душина. — М.: Энергоатомиздат, 1987. — 480 с.
4. Чинков В.М. Цифрові вимірювальні прилади / В.М. Чинков. — Харків: НТУ "ХПИ", 2008. — 494 с.
5. Шляндин В.М. Цифровые измерительные устройства / В.М. Шляндин. — М.: Высшая школа, 1981. — 622 с.
6. Полулях К.С. К расчету параметров параллельно-последовательных цифровых измерительных приборов / К.С. Полулях, Л.А. Медведева, И.И. Тополов // Вестник национального технического университета "ХПИ". — 2011. — Вып. 11.

УДК 621.3.089

## ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДУ ВНУТРІШНЬОГО КОНТРОЛЮ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕНЬ ПЕРЕХІДНИХ ФУНКЦІЙ ДАВАЧІВ ТИСКУ

А.О. Коваль, аспірант Харківського національного автомобільно-дорожнього університету



*Розглянуто метод внутрішнього контролю параметрів моделі передаточної функції давача. Визначено основні властивості методу. Запропоновано систему корекції параметрів моделі давача.*

*The method of internal control of model parameters of the gauger transfer function is considered.*

*The basic properties of the method are determined. The correction system of the gauge model parameters is offered.*

#### Вступ

**Постановка проблеми.** У процесі експлуатації вимірювальних систем на техногенно-небезпечних об'єктах, таких, як атомні електростанції (АЕС), важливо знати поточні метрологічні характеристики давачів тиску та температури, які використовуються в системах технічної діагностики і автоматичного управління технологічними процесами. Одним із перспективних напрямків постійного бездемонтажного контролю елементів об'єктових вимірювальних систем є онлайн-діагностика, основою якої є постійний збір вимірювальної інформації, її

метрологічний аналіз та прийняття рішень щодо змісту метрологічного забезпечення експлуатації об'єктових вимірювальних систем з урахуванням їх фактичного стану [1, 2]. Експрес-аналіз поточних метрологічних характеристик давачів вимірювальних систем ґрунтується на базі знань динамічних характеристик за кожним типом давача. Експертна база знань поповнюється і оновлюється як за рахунок метрологічних випробовувань давачів, так і за рахунок математичного моделювання їх динамічних перехідних функцій [3].

Основна технічна проблема полягає у створенні єдиної для всіх техногенно-небезпечних об'єктів (наприклад, АЕС) високоточної бази знань щодо давачів різних типів, яка дозволяє локально коригувати параметри моделі кожного типу давача, що пов'язані з особливостями експлуатації на конкретній АЕС.

Важливим завданням за наявності такої єдиної бази знань щодо давачів і автоматизованої системи корекції їх моделей на кожному об'єкті є виявлення технологічних впливів і експлуатаційних невідповідностей, які призводять до відхилення метрологічних характеристик від установлених виробником.

Таким чином, для прийняття рішень щодо метрологічного забезпечення експлуатації об'єктових вимірювальних систем із урахуванням їхнього фактичного стану при мінімумі ризику необхідно мати якомога повну і достовірну експертну базу знань за всіма типами давачів. У цих умовах важливим є використання передових методів підвищення точності динамічних моделей давачів, які закладаються в експертні бази знань.

*Аналіз публікацій.* Математичні моделі давачів у вигляді передатних функцій наведено в [4–8]. Однак у цих роботах не розглянуто методики корекції параметрів моделі давача, які б дозволили автоматизувати цей процес. У роботах [8–10] недостатньо повно досліджено властивості системи внутрішнього контролю. Крім того, у зазначених роботах використання методу внутрішнього контролю з метрологічної точки зору не розглядалося.

*Метою статті* є розробка системи внутрішнього контролю для підвищення точності моделі вимірювального перетворювача за рахунок фільтрації нев'язки між моделлю та реальною передатною функцією (ПФ) давача.

### Викладення основного матеріалу

Як відомо [5–7, 11], модель давача не може повною мірою повторити оригінал. Це пов'язано як з ентропією вимірювального процесу на вході давача, так і з певною ентропією динамічних характеристик давача. Ентропія динамічних характеристик давача обумовлюється як режимами роботи давача, так і “старінням” його елементів. У цьому випадку необхідно не тільки перевіряти розроблену модель давача на адекватність, а й коригувати її. Для цього

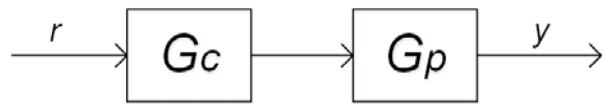


Рис. 1. Узагальнена схема методу внутрішнього контролю

пропонується використовувати метод внутрішнього контролю моделі.

Відповідно до [12], перехідна функція елементарного перетворювача, без урахування часу запізнення, зв'язана з його передатною функцією залежністю

$$h(t) = L^{-1} \left\{ \frac{1}{s} \cdot G_p(s) \right\}.$$

У подальшому будемо оперувати передатною функцією давача.

Сутність методу внутрішнього контролю [10] з метрологічної точки зору можна трактувати так. Якщо передатну функцію вимірювального перетворювача можна подати у вигляді сукупності передатних функцій простих кіл низьких порядків, то підбираючи їх параметри, можна мінімізувати нев'язку між реальною передатною функцією давача та її моделлю.

Процес корекції параметрів моделі ПФ вимірювального давача в подальшому будемо розглядати з точки зору управління параметрами розімкненої та замкненої систем управління.

Узагальнену структурну схему методу наведено на рис. 1.

Оскільки ми маємо розімкнену систему, то вихідний сигнал визначається як

$$y = G_c \cdot G_p \cdot r,$$

де  $G_p$  – реальна ПФ давача;  $r$  – еталонний вхідний сигнал;  $G_c$  – функціонал управління параметрами ПФ давача.

Прийmemo, що комплексна сумарна модель ПФ  $G_p^*$  повністю відтворює реальну ПФ давача  $G_p$ :

$$G_p = G_p^*.$$

Тоді, якщо функціонал  $G_c$  буде оберненим до моделі ПФ  $G_c = G_p^{*-1}$ , то на виході будемо мати

$$y = G_p^{*-1} \cdot G_p^* \cdot r = 1 \cdot r = r.$$

Звідси випливає, що вихід завжди буде дорівнювати контрольному еталонному сигналу. Слід зазначити, що це можливо лише при повністю визначеній ПФ давача  $G_p$ .

На практиці завжди є певна розбіжність між реальною ПФ та її моделлю [7, 8], викликана як “старінням” давача [2], так і дією зовнішніх перешкод і внутрішніх шумів [1]. З урахуванням цього

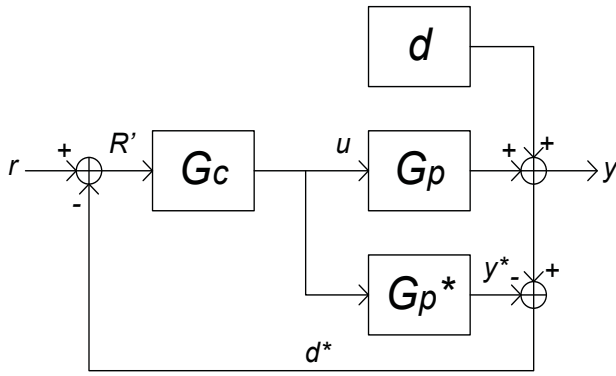


Рис. 2. Замкнена схема внутрішнього контролю

зміниться і структурна схема (рис. 2), яка реалізує метод внутрішнього контролю. Наведена схема має такі змінні параметри:  $G_c$  – функціонал управління параметрами ПФ давача;  $G_p$  – реальна ПФ давача;  $G_p^*$  – модель ПФ давача;  $r$  – еталонний контрольний сигнал;  $R'$  – модифікований контрольний сигнал для корекції моделі давача;  $u$  – вихід значення функціоналу  $G_c$  з урахуванням помилки  $d^*$ ;  $d$  – перешкода;  $d^*$  – оцінка нев'язки між реальною ПФ та її моделлю;  $y^*$  – вихід моделі давача.

Сигнал зворотного зв'язку  $d^*$  визначається як

$$d^* = (G_p - G_p^*) \cdot u + d.$$

Сигнал корекції функціоналу  $G_c$  дорівнює

$$R' = r - d^* = r - (G_p - G_p^*) \cdot u - d.$$

Цей підхід має певні обмеження. Якщо модель повністю відтворює реальну ПФ, то  $G_p = G_p^*$ . Тоді  $R' = r - d$ , а  $y = R' \cdot G_c \cdot G_p$ . Якщо перешкода відсутня, тобто  $d = 0$ , то  $y = r \cdot G_c \cdot G_p$ .

Таким чином, отримана залежність є аналогом вихідного сигналу системи корекції з розімкненим контуром. Якщо функціонал  $G_c$  буде стійким, то замкнена система корекції параметрів моделі ПФ також буде стійкою.

На практиці перешкода  $d \neq 0$  і завжди має місце різниця між реальною ПФ та її моделлю. Це вимагає, щоб функціонал  $G_c$  був оптимальним із точки зору мінімуму нев'язки та швидкодії. З урахуванням цього зміниться і структурна схема, яка реалізує метод внутрішнього контролю. На рис. 3 наведено схему алгоритму, який реалізує метод внутрішнього контролю.

У цьому випадку  $G_c(s)$ ,  $G_p(s)$ ,  $G_p^*(s)$  і  $d(s)$  будуть не векторами, а багатомірними матрицями, які змінюються у часі. Сигнал зворотного зв'язку буде мати вигляд

$$d^*(s) = [G_p(s) - G_p^*(s)] \cdot u(s) + d(s),$$

сигнал похибки –

$$R'(s) = r(s) - d^*(s).$$

Вихід функціоналу буде визначений як  $G_c(s)$ :

$$\begin{aligned} u(s) &= R'(s) \cdot G_c(s) = [r(s) - d(s)] \cdot G_c(s) = \\ &= [r(s) - \{[G_p(s) - G_p^*(s)] \cdot u(s) - d(s)\}] \cdot G_c(s) \\ u(s) &= \frac{[r(s) - d(s)] \cdot G_c(s)}{1 + [G_p(s) - G_p^*(s)] \cdot G_c(s)}. \end{aligned}$$

Але  $y(s) = G_p(s) \cdot u(s) + d(s)$ . Тоді ПФ замкненої системи внутрішнього контролю (рис. 3) буде мати вигляд

$$y(s) = \frac{G_c(s) \cdot G_p(s) \cdot r(s) + [1 - G_c(s) \cdot G_p^*(s)] \cdot d(s)}{1 + [G_p(s) - G_p^*(s)] \cdot G_c(s)}.$$

Тепер, якщо функціонал  $G_c(s)$  буде близький до інверсної моделі ПФ  $G_c(s) = G_p^*(s)^{-1}$ , то можна зменшити нев'язку між моделлю та реальною ПФ. Окрім того, для підвищення стійкості системи необхідно мінімізувати похибку, викликану нев'язкою між моделлю і реальною ПФ.

Як показали дослідження [1], найчастіше нев'язка має місце у високочастотній частині амплітудно-частотної характеристики давача. Тому для зменшення нев'язки моделі з реальною ПФ давача пропонується використовувати фільтр нижніх частот  $f(s)$ .

Таким чином, реалізація методу внутрішнього контролю стосовно підвищення точності моделі ПФ давача є не що інше, як інверсія моделі ПФ послідовно з низькочастотною фільтрацією:

$$G_{\text{МВК}}(s) = G_c(s) \cdot G_f(s), \quad (1)$$

де  $G_f(s) = 1 / (1 + \tau_f \cdot s)^n$  – ПФ оптимального фільтра.

Порядок фільтра  $n$  вибирається таким чином, щоб уникнути надмірної диференціовальної дії коригувальних сигналів. З урахуванням вищевказаного кінцевий алгоритм буде мати такий вигляд:

$$\begin{aligned} y(s) &= \\ &= \frac{G_{\text{МВК}}(s) \cdot G_p(s) \cdot r(s) + [1 - G_{\text{МВК}}(s) \cdot G_p^*(s)] \cdot d(s)}{1 + [G_p(s) - G_p^*(s)] \cdot G_{\text{МВК}}(s)}. \end{aligned}$$

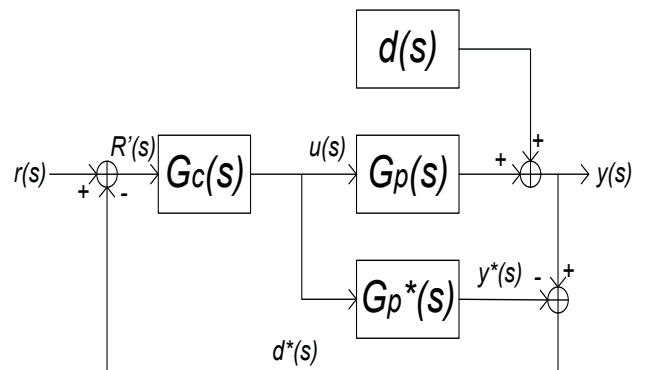


Рис. 3. Схема алгоритму методу внутрішнього контролю

Розглянемо на прикладі використання методу внутрішнього контролю для корекції параметрів моделі ПФ давача тиску 1УС10Р20В1.

Реальна ПФ давача такого типу визначена експериментально [7, 8] і описується рівнянням

$$G_p(s) = \exp(-0,441176 \cdot s) \times \frac{2,72 \cdot (1 + 0,05 \cdot s)}{(1 + 0,2 \cdot s) \cdot (1 + 0,8 \cdot s + 0,2 \cdot s^2)}$$

Модель ПФ для давача тиску цього типу можна описати виразом

$$G_p^*(s) = \exp(-677083 \cdot s) \times \frac{2,73913}{(1 + 0,712228 \cdot s)}$$

Згідно з виразом (1) і враховуючи, що  $G_c(s) = G_p^{*-1}(s)$ ,  $G_{МВК}(s)$  визначиться таким чином:

$$G_p^*(s) = G_p^{*+}(s) \cdot G_p^{*-}(s);$$

$$G_p^{*-}(s) = \exp(-677083 \cdot s);$$

$$G_p^{*+}(s) = \frac{2,73913}{(1 + 0,712228 \cdot s)};$$

$$G_p^{*+}(s)^{-1} = 0,365079 \cdot (1 + 0,712228 \cdot s).$$

Далі, вважаючи, що  $G_{МВК}(s)$  повинен бути оберненим до  $G_p^{*+}(s)$  і послідовно з'єднаним із фільтром нижніх частот  $G_f(s)$ , отримуємо вираз для  $G_{МВК}(s)$ :

$$G_{МВК}(s) = G_p^{*+}(s)^{-1} \cdot G_f(s) = \frac{0,365079 \cdot (1 + 0,712228 \cdot s)}{(1 + \tau_f \cdot s)^n} \quad (2)$$

При  $n = 1$  маємо стаціонарний режим,  $G_{МВК}(s)$  буде стійким, якщо постійну фільтра низьких частот вибрати рівною постійній часу розімкненого контуру. У нашому випадку, як видно з виразу (2),  $\tau_f = 0,712228$ .

Проаналізуємо поведінку замкненого контуру корекції параметрів моделі ПФ давача тиску, беручи до уваги, що  $G_p(s) = G_p^*(s)$ .

$$y(s) = G_p^{*+}(s)^{-1} \cdot G_f(s) \cdot G_p(s) \cdot r(s) + \left[ 1 - G_p^*(s) \cdot G_f(s) \cdot G_p^*(s) \right] \cdot d(s);$$

$$y(s) = G_p^{*-}(s) \cdot G_f(s) \cdot r(s) + \left[ 1 - G_p^{*-}(s) \cdot G_f(s) \right] \cdot d(s);$$

$$y(s) = \frac{\exp(-677083 \cdot s)}{1 + \tau_f \cdot s} \cdot r(s) + \left[ 1 - \frac{\exp(-677083 \cdot s)}{1 + \tau_f \cdot s} \right] \cdot d(s).$$

Таким чином, можна зробити висновок, що замкнена система корекції параметрів моделі ПФ давача характеризується такими властивостями:

- вона забезпечує компенсацію часу затримки;
- низькочастотний фільтр може бути використаний для фільтрації нев'язки між реальною ПФ давача та її моделлю;
- у стаціонарному режимі схема дозволяє компенсувати зміщення ПФ.

### Висновки

Запропоновано алгоритм, який реалізує метод внутрішнього контролю для корекції параметрів моделі передатної функції вимірювального давача.

Проаналізовано особливості застосування методу внутрішнього контролю для фільтрації нев'язки між моделлю і реальною ПФ давача.

У подальшому система внутрішнього контролю параметрів моделі давача у вигляді передатної функції може бути застосована для оцінки динамічної похибки вимірювання та для розроблення методики синтезу оптимального давача.

### Список літератури

1. *Хашемиан Х.М.* Техническое обслуживание измерительных устройств на атомных электростанциях / Х.М. Хашемиан. – М.: Изд-во “Бином”, 2012. – 354 с.
2. *Хашемиан Х.М.* Датчики технологических процессов: характеристики и методы повышения надежности / Х.М. Хашемиан. – М.: Изд-во “Бином”, 2008. – 336 с.
3. ANSI/ISA-67.06.01-2010, Performance Monitoring for Nuclear Safety Related Instrument Channels in Nuclear Power Plants, ISA // The Instrumentation, Systems, and Automation Society, 2012.
4. *Ruan D.* Power Plant Surveillance and Diagnostics / D. Ruan // Paper 23, p. 355–376, Springer-Verlag, 2012.
5. *Грановский А.В.* Динамические измерения в отраслях энергетического, тяжелого и транспортного машиностроения / А.В. Грановский, В.М. Домницкий, В.А. Соломоник // Измерительная техника. – 1985. – № 1. – С. 3–4.
6. *Фрайден Дж.* Современные датчики: справочник / Дж. Фрайден. – М.: Техносфера, 2005. – 592 с.
7. Визначення постійної часу давача при розв'язанні оберненої задачі вимірювань / А.О. Коваль, А.І. Котова, Є.О. Поляков, О.В. Полярус // Метрологія та прилади. – 2014. – № 1 (45). – С. 111.

8. *Коваль А.О.* Динамічна нейромережева модель первинного перетворювача / А.О. Коваль, О.В. Полярус, А.О. Подорожняк // Вісник Національного технічного університету “ХПІ”: зб. наук. праць. – Харків: НТУ “ХПІ”, 2014. – № 35 (1078). – 201 с. – (Сер. “Інформатика та моделювання”).
9. Proceedings of the International Conference on Wire System Aging, NUREG/CP-0179, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington D.C. (November 2002).
10. *Ming T.* Internal Model Control, Chemical and Process Engineering, 2012, part 3.
11. *Самарский А.А.* Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры / А.А. Самарский, А.П. Михайлов. – М.: Физматлит, 2002. – 483 с.
12. *Попов Е.П.* Теория линейных систем автоматического регулирования и управления: учеб. пособ. для вузов / Е.П. Попов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989. – 304 с.