

УДК 621.3.089

ВИЗНАЧЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИМІРЮВАЛЬНИХ КАНАЛІВ ТИСКУ

О.В. Полярус, проф., д.т.н., А.О. Коваль, асист., Я.С. Бровко, асп.,
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Анотація. Запропоновано метод визначення динамічних характеристик вимірювальних каналів тиску на основі обробки реалізацій випадкових процесів на виході датчика тиску.

Ключові слова: вимірювальний канал тиску, динамічні характеристики, вимірювальна лінія, датчик тиску.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ КАНАЛОВ ДАВЛЕНИЯ

А.В. Полярус, проф., д.т.н., А.А. Коваль, ассист., Я.С. Бровко, асп.,
Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет

Аннотация. Предложен метод определения динамических характеристик измерительных каналов давления на основе обработки реализаций случайных процессов на выходе датчика давления.

Ключевые слова: измерительный канал давления, динамические характеристики, измерительная линия, датчик давления.

DETERMINATION OF DYNAMIC CHARACTERISTICS OF MEASURING PRESSURE CHANNELS

O. Poliarus, Prof., D. Sc. (Eng.), A. Koval, T. Asst., Ya. Brovko, P.G.,
Kharkiv National Automobile and Highway University

Abstract. The method of determination of dynamic characteristics of the measuring pressure channels based on the processing of the random processes realization at the output of the pressure sensor has been proposed.

Key words: measuring pressure channel, dynamic characteristics, measuring line, pressure sensor.

Вступ

Якість роботи технічно складних об'єктів значною мірою визначається динамічними характеристиками (ДХ) вимірювальних каналів тиску. Такі вимірювальні канали, як правило, входять до складу систем управління об'єктів і містять вимірювальну лінію, датчики тиску та систему обробки і передачі вимірювальної інформації.

Динамічні властивості складових вимірювального каналу описуються перехідною та

імпульсними характеристиками і найбільш просто характеризуються постійною часу, яка, згідно із сучасними вимогами для кожної складової каналу, не повинна перевищувати 100 мс [1].

Аналіз показує, що постійна часу систем обробки і передачі вимірювальної інформації у більшості випадків є істотно меншою за постійні часу датчиків тиску та вимірювальної лінії (ВЛ). Ця лінія являє собою трубопровід складної форми круглого поперечного перерізу, який з'єднує основну трубу, що входить

до технологічного обладнання об'єкта, з датчиком тиску. Вимірювальна лінія містить рідину, що передає тиск технологічного процесу до датчика.

Аналіз публікацій

Незважаючи на важливість інформації про ДХ вимірювального каналу тиску, кількість публікацій за цією тематикою не є великою. Найбільше публікацій має професор Х.М. Хашеміан (США), наприклад, [2]. На практиці динамічні характеристики каналів у більшості випадків не вимірюються. Періодично здійснюється перевірка тільки статичної функції перетворення датчика, причому останній знімається з об'єкта і калібрується на спеціалізованому стенді. Подібні операції часто потребують великих затрат. Тому в [2] розглядаються бездемонтажні методи контролю ДХ елементів вимірювального каналу, насамперед датчиків тиску. Для контролю використовується метод аналізу шумів [2] технологічного процесу. Шуми на вході датчика зумовлені турбулентністю потоку рідини.

Ширина спектра флуктуацій тиску рідини часто перевищує ширину смуги пропускання датчика, і тому зазначений шум наближено вважають «білим». Вхідна дія для датчика тиску на окремих відрізках часу є нестационарною. Після усереднення здійснюється спектральний аналіз процесу і за частотою зрізу усередненого спектра визначається в результаті простого перерахунку постійна часу ВЛ [2]. Метод потребує налаштування до конкретного технологічного процесу і не враховує можливої нелінійності елементів каналу, зокрема ВЛ. Отже, практика потребує інших підходів до визначення ДХ.

Мета і постановка завдання

Метою статті є розробка методу визначення постійної часу вимірювального каналу тиску на основі обробки і аналізу реалізацій випадкових процесів на виході датчика тиску.

Визначення динамічних характеристик

Будемо розглядати спрощену схему вимірювального каналу у вигляді послідовного з'єднання ВЛ та датчика тиску. З точки зору динамічних властивостей датчик тиску найчастіше можна вважати лінійною інерційною

системою, яка описується диференціальним рівнянням першого порядку [3].

$$\tau_d \frac{dy_d(t)}{dt} + y_d(t) = k \cdot x_d(t), \quad (1)$$

де τ_d – постійна часу датчика; $x_d(t)$ – вхідна дія датчика тиску або вихідна дія ВЛ $y_{ВЛ}(t)$ ($x_d(t) = y_{ВЛ}(t)$); $y_d(t)$ – вихідний сигнал датчика; k – постійний коефіцієнт, що використовується при моделюванні.

Вимірювальна лінія є трубою складної форми, що наповнена рідиною. Якщо рідина є ідеальною, тобто має властивість ізотропності, нестисливості за відсутності теплопровідності і теплопередачі, то тиск від труби основного технологічного процесу передається по ВЛ із затримкою, що дорівнює довжині ВЛ, поділеній на швидкість поширення акустичної хвилі в рідині. Постійна часу такої лінії дорівнює нулю, і вона має нескінченну ширину смуги пропускання.

Реально ВЛ містить рідину, всередині якої є повітряні бульбашки, домішки, і тому рідина є стисливою. При статичному навантаженні проявляються нелінійні властивості ВЛ, що є очевидним з фізичних міркувань. Крім того, у вимірювальній лінії у процесі експлуатації з'являються закупорки, забруднення, змінювання конфігурації внутрішнього перерізу лінії та ще додаткові негативні ефекти взимку. Таким чином, на практиці ВЛ можна вважати нелінійною інерційною системою. За таких умов точний розрахунок ВЛ стає практично неможливим. В окремих випадках постійна часу ВЛ $\tau_{ВЛ}$ може бути істотно меншою, ніж час кореляції вхідної дії τ_k , тобто $\tau_{ВЛ} \ll \tau_k$. У цій ситуації розв'язання задачі розрахунку ВЛ може розглядатись, у квазістационарному наближенні [4]. Тоді, з математичної точки зору, вимірювальна лінія є нелінійною неінерційною ланкою і постійна часу вимірювального каналу дорівнює постійній часу датчика тиску.

У загальному випадку для аналізу нелінійних інерційних систем необхідно використовувати метод функціональних рядів Вольєрра, який було запропоновано вже давно [5], але він виявився громіздким і незручним для практичного застосування. Тому в [4] запропоновано штучне розділення в математичній

моделі ВЛ функцій нелінійності та інерційності системи. Залежно від порядку виконання цих функцій розрізняють підходи Вінера та Гаммерштейна.

Для аналізу ДХ вимірювальних каналів тиску прийнятним є тільки підхід Гаммерштейна, коли модель ВЛ подають у вигляді послідовно з'єднаних моделей нелінійної неінерційної частини ВЛ та лінійної інерційної частини. Перевірка роботи подібної моделі для сервомеханізмів, що проведена в [6], довела її працездатність. Отже, модель вимірювального каналу тиску має структуру, наведену на рис. 1.

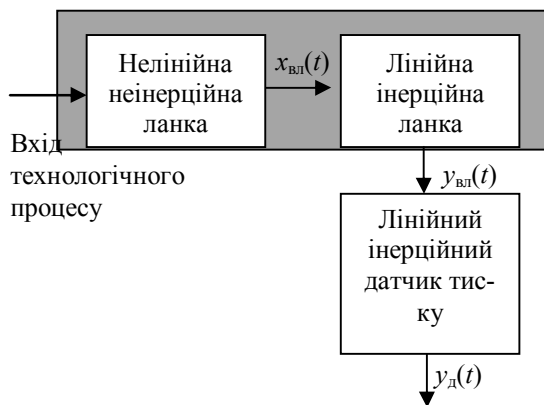


Рис. 1. Спрощена математична модель вимірювального каналу тиску

У моделі є послідовно з'єднані лінійні інерційні ланки, які об'єднати в загальному випадку не завжди можна, оскільки їх ДХ, як правило, відрізняються. Отримати перехідну характеристику датчика тиску відносно просто за наявності спеціалізованого стенда, в якому на вхід датчика подається імпульсна дія типу «сходінка». Технічно складніше це зробити для ВЛ, особливо з урахуванням нелінійної ланки. В [7] приведено вираз для перехідної характеристики, який свідчить про коливальний вид цієї характеристики, який, однак, за наявності демпфуючих властивостей лінії та датчика наближається до характеристики, яка є властивою для динамічних систем першого порядку, що описується рівнянням (1). Отже, обидві лінійні інерційні ланки моделі (рис. 1) будемо описувати диференціальним рівнянням першого порядку, в якому будуть відрізнятися постійні часу τ_d та $\tau_{вл}$. У такому випадку можна використовувати один і той же метод для визначення постійної часу.

Метод визначення постійної часу датчика τ_d розроблений нами і описаний в [8]. Сутність його зводиться до наступного. Виміряна реалізація випадкового процесу $x_d(t)$ розкладається в ряд Карунена–Лосєва як сума добутків випадкових коефіцієнтів a_i на ортогональні функції $\psi_i(t)$, причому в силу специфіки змінювання тиску у вимірювальній лінії кількість членів ряду n є невеликою. Імпульсна характеристика датчика тиску може бути виміряна перед постановкою його на об'єкт або може навіть залишатись невідомою. В більшості випадків маємо загальний вигляд функції, що описує таку характеристику, наприклад, функція

$$H(t) = U_0 / \tau_d \cdot e^{-t/\tau_d}, \quad (2)$$

де U_0 – амплітудне значення, а τ_d – постійна часу датчика.

Отже, рівняння згортки для датчика має вигляд

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{U_0}{\tau_d} e^{-\frac{t-\tau}{\tau_d}} \sum_{i=1}^n a_i \psi_i(t-\tau) d\tau. \quad (3)$$

Невідомими у формулі (3) є коефіцієнти a_i , U_0 та постійна часу τ_d . Ліва частина рівняння, тобто $y(t)$, визначається експериментально і являє собою реалізацію випадкового процесу тиску. Права частина (інтеграл) є теоретичною функцією, що описує поведінку тиску на виході ВЛ. В ідеальному випадку функції, що описують експериментальний і теоретичний сигнали, при правильно визначених параметрах a_i , U_0 , τ_d повинні співпадати. У функціональному просторі з квадратичною метрикою відстань між цими сигналами є деяким числом J або функціоналом

$$J = \int_0^T \left[y(t) - \int_{-\infty}^{\infty} \frac{U_0}{\tau_d} e^{-\frac{t-\tau}{\tau_d}} \sum_{i=1}^n a_i \psi_i(t-\tau) d\tau \right]^2, \quad (4)$$

який потребує мінімізації шляхом варіацій a_i , U_0 , τ_d . Час T характеризує тривалість реалізації випадкового процесу і не перевищує інтервалу стаціонарності цього процесу.

На рис. 2 наведено структурну схему наближеного методу розв'язання оберненої задачі вимірювань для визначення постійної часу датчиків.

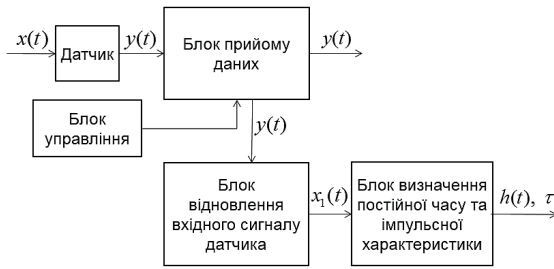


Рис. 2. Структурна схема наближеного методу розв'язання оберненої задачі вимірювань

Мінімізація функціонала (4) здійснювалась з використанням відомого методу глобального випадкового пошуку екстремуму – генетичного алгоритму. В результаті пошуку було отримано значення a_i , U_0 , τ_d , причому два останні значення використовувались для побудови імпульсної характеристики датчика. Отримані коефіцієнти a_i використовуються для відновлення вхідної дії датчика $x_d(t)$. На рис. 4 наведені результати розрахунку постійної часу датчика для 10 ітераційних розрахунків за формулою (4). Всього було проведено 50 розрахунків, в яких реалізації сигналів були різними. Розкид значень постійної часу датчика тиску був обумовлений особливостями запропонованого методу, тобто: наближеним розкладанням у ряд вхідної дії $x_d(t)$ та оптимізацією функціонала (4) за допомогою глобального випадкового пошуку. Середнє значення постійної часу датчика склало 283 мс, середньоквадратичне відхилення становило 7,5 мс на початковому етапі розрахунків (коли відомості про a_i , U_0 були зовсім відсутні) і 4,5 мс після 9 ітераційних розрахунків. Точність методу визначення постійної часу датчика оцінювалась шляхом порівняння теоретичних значень постійної часу τ_d з експериментальними даними, отриманими авторами.

Результати оцінки відносної похибки визначення постійної часу датчика $\delta\tau$ наведені на рис. 5. Через декілька ітерацій похибка $\delta\tau$ зменшилась до 7%. Постійна часу датчика (рис. 3) становила 295 мс, тобто є близькою до теоретично визначеного середнього значення (283 мс). Відносна похибка теоретич-

ного методу визначення τ_d становить у цьому випадку близько чотирьох відсотків.

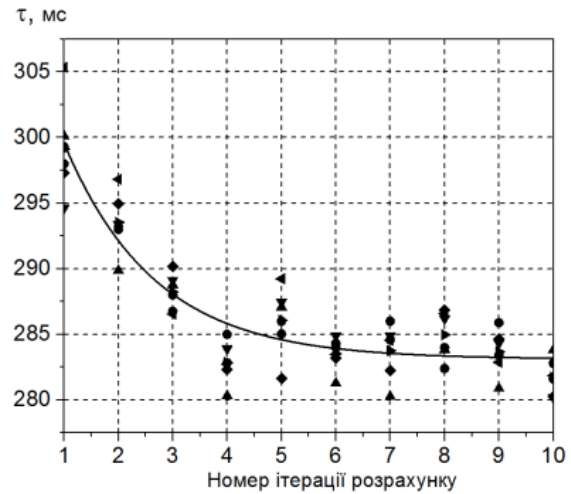


Рис. 3. Постійні часу датчика тиску в десяти математичних експериментах

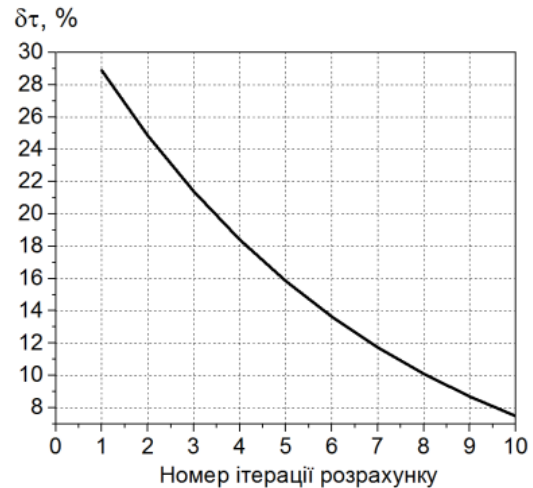


Рис. 4. Відносна похибка визначення постійної часу датчика методом розв'язання оберненої задачі вимірювань

З урахуванням «старіння» датчиків імпульсні характеристики можуть описуватись вже не простою формулою, а у вигляді ряду, але методика їх визначення залишається такою самою. При цьому підсилюються вимоги щодо обсягу апріорних знань про вхідну дію датчика тиску.

Постійна часу в цих випадках визначається з графіків перехідних характеристик, а не безпосередньо з функціонала (4). У виразі (4) відсутні шуми, які завжди є на входах та виходах датчиків. Точність розв'язання оберненої задачі вимірювань підвищується, якщо відфільтрувати шуми на виході датчика. Дійсно, це є правомірним, оскільки високочас-

тотні шуми не пов'язані з технологічним процесом. Такі шуми на вході датчика звичайно не попадають у смугу пропускання датчика і тому не враховуються при мінімізації функціонала. Ймовірність отримання «фантомних» рішень у процесі розв'язання оберненої задачі вимірювань є близькою до нуля завдяки наявності достовірної апріорної інформації про вид вхідної дії та форму імпульсної характеристики датчика. Оскільки час роботи генетичного алгоритму при розв'язанні задач такого типу найчастіше не перевищує кілька десятків секунд, то на визначення τ_d потрібно на порядки менше часу, ніж у методі аналізу шумів, що зараз широко використовується. У результаті розв'язання оберненої задачі вимірювань отримуємо вхідну дію $x_d(t)$ або $y_{ВЛ}(t)$. Повторна процедура мінімізації функціонала (4) стосовно вже вимірювальної лінії дозволяє визначити постійну часу ВЛ $\tau_{ВЛ}$. Для коректного розв'язання задачі необхідно мати апріорну інформацію як про $\tau_{ВЛ}$, так і про математичну модель вхідної дії ВЛ $x_{ВЛ}(t)$, що для даного типу задач не є великою проблемою.

Висновки

У статті подано розроблений авторами метод визначення постійної часу вимірювального каналу тиску, який потребує вимірювання реалізації випадкового процесу на виході датчика тиску, компенсації шумів на виході датчика тиску за наявності апріорної інформації про вид вхідних дій датчика та вимірювальної лінії. Порівняння результатів визначення постійної часу датчика запропонованим методом з результатами експерименту свідчить про прийнятну інженерну точність (відносні похибки складають декілька відсотків). Похибки визначення постійної часу вимірювальної лінії будуть приблизно у два рази більшими, тобто можуть досягати порядку 10 %, за умови наявності апріорної інформації про вид імпульсної характеристики лінії. На жаль, відсутність достовірної експериментальної інформації про постійну часу вимірювальної лінії не дає можливості встановити ефективність запропонованого методу для всієї лінії. Результати,

отримані методом аналізу шумів, також є наближеними. Перевагою запропонованого методу, порівняно з методом аналізу шумів, є істотний вигреш у часі розв'язання вимірювальної задачі.

Література

1. Shepard R. L. Evolution of pressure Sensing Concepts: A Technology Assesment / R. L. Shepard, L. H. Thacker // OAK Ridge National Laboratory, 1993. – 50 p.
2. Хашемиан Х. М. Датчики технологических процессов : характеристики и методы повышения надёжности / Х.М. Хашемиан; пер. с англ. А. Н. Косилова. – М. : БИНОМ, 2008. – 336 с.
3. Mokin B. I. Method of identification of nonlinear dynamic object with extreme static characteristics / B.I. Mokin, O. V. Mokin // Наукові праці ВНТУ. – 2009. – № 2. – Р. 1–8.
4. Тихонов В. И. Нелинейное преобразование случайных процессов / В. И. Тихонов. – М. : Радио и связь, 1986. – 266 с.
5. Кузнецов П. И. Прохождение случайных функций через нелинейные системы / П. И. Кузнецов, Р. Л. Стратонович, В. И. Тихонов // Автоматика и телемеханика. – 1953. – Т. 14., № 4. – С. 375–391.
6. Babik Z. Hammerstein and Wiener models in modeling of nonlinear process/ Z. Babik // Proceeding of the 22nd International DAAAM Symposium. – 2011. – Vol. 22, № 1. – P. 0663–0664.
7. Hashemian H. M. Maintenance of process Instrumentation in Nuclear Power Plants/ H. M. Hashemian // Springer, 2006. – 303 p.
8. Коваль А. А. Визначення постійної часу датчика при розв'язанні оберненої задачі вимірювань / А. А. Коваль, А. І. Котова, Є. О. Поляков, О. В. Полярус // Метрологія та прилади: науково-виробничий журнал (тематичний випуск). – 2014. – Вип. III (45). – С. 111–114.

Рецензент: Л. І. Нефьодов, професор, д.т.н., ХНАДУ.

Стаття надійшла до редакції 15 квітня 2016 р.