

## Прецизійний контактний вимірювач переміщення

Сучасне машинобудування, приладобудування, робототехніка, оптичне виробництво, авіабудування та інші галузі промисловості, де виробляються та застосовуються механічні прилади, тісно пов'язані з необхідністю точного вимірювання переміщення об'єктів і вимірюванням їхніх лінійних розмірів. Різноманіття областей використання приладів для вимірювання лінійних переміщень і відстаней, постійне зростання вимог до точності датчиків, діапазону вимірюваних величин, а також спрямованість на вирішення конкретних практичних завдань дозволяють говорити про те, що розробка і дослідження нових вимірювачів лінійних переміщень і вимірювачів відстаней, а також удосконалення існуючих датчиків є важливим і актуальним завданням. Практичними прикладами завдань, що вирішуються існуючими вимірювачами лінійних величин, є контроль і вимірювання геометричних характеристик виробу (вимір габаритів, вимір відхилення форми і розташування поверхонь); забезпечення точного позиціонування окремих вузлів складальних одиниць при їх складанні у точному приладобудуванні; точне позиціонування рухомих елементів тощо. Серед різноманітних технічних рішень створення високоточних приладів вимірювання переміщення варто виокремити вимірювачі з контактним методом вимірювання та використанням індуктивних перетворювачів з цифровим відліком результату вимірювання. Контактним вимірювачам переміщення, які використовують індуктивні датчики, притаманна простота виготовлення та застосування. Вони не вибагливі до середовища застосування і мають доволі високі метрологічні характеристики.

**Ключові слова:** датчик; феритовий магнітопровід; різниця фаз; формувач короткого імпульсу.

**Актуальність теми.** Для вимірювання механічних величин у технічних системах при виготовленні, випробуваннях, діагностиці вузлів та механізмів важливе місце займають прилади прецизійного вимірювання переміщення контактним методом. Один з перспективних шляхів створення високоточних приладів вимірювання та контролю переміщення контактним методом - використання індуктивних перетворювачів з цифровим відліком результату вимірювання.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій, на які спирається автор.** На практиці використовуються різноманітні пристрої для вимірювання переміщень контактним методом з різними схемами включення індуктивних датчиків. Однією з найбільш поширених схем включення є мостова схема, яка містить в двох плечах обмотки датчика, а в двох інших плечах - врівноважуючі опори [1]. Як правило, у вимірювальну діагональ мостової схеми включається індикатор сигналу з великим вхідним опором. Для додавання пристрою властивості чутливості до фазового здвигу індикатор сигналу (вольтметр або амперметр) включається, як правило, через випрямну схему [2].

Питання побудови та дослідження роботи електромагнітних датчиків переміщення висвітлювалися в публікаціях низки авторів [3, 4, 6–10]. Разом з тим, в цих роботах не досліджували вплив багатьох факторів, які мають місце в умовах експлуатації на виробництві, зокрема вплив температури середовища.

**Метою статті** є розробка та дослідження контактного датчика лінійних переміщень, який працює в умовах виробництва. Розробити структурну схему і конструкцію датчика лінійних переміщень на феритових магнітопроводах, що забезпечує високу чутливість, точність і стабільність результатів вимірювання.

**Викладення основного матеріалу.** Характерною рисою світового розвитку інформаційних і керуючих систем кінця ХХ – початку ХХІ століття є все більш широке застосування в усіх сферах життєдіяльності датчиків різноманітних фізичних величин. Датчики застосовуються в промисловому контролі, в автоматизації виробничих процесів, в автомобільному, авіаційному і залізничному транспорті, ракетно-космічній та авіаційній техніці. Особливо велика їх роль при вимірах фізичних величин в умовах відмінних від лабораторних.

Датчики фізичних величин стають основними елементами, що визначають технічний рівень, вартість інформаційних і керуючих систем. При цьому, крім високих метрологічних характеристик датчики повинні мати високий ступінь надійності, довговічності, стабільності, малі габарити, масу і енергоспоживання.

Механічна частина спроектованого диференційного індуктивного датчика вимірювача переміщення представлена на рисунку 1. Котушки  $L1$  і  $L2$  розміщені на двох Ш-образних феритових магнітопроводах 2, встановлених із зазором. У зазорі між магнітопроводами розміщений ярмір 1, виготовлений у вигляді

пластини з феромагнітного матеріалу, Якір механічно пов'язаний з коромислом 3, яке переміщується під дією сил прикладених з боку контрольованого механізму. Коромисло 3 має високу власну жорсткість, що дозволяє побудувати мультиплікатор передачі переміщення від об'єкта вимірювання до переміщення якоря 1 між магнітопроводами 2 котушок  $L1$  та  $L2$  як відношення важелів коромисла 3 та якоря 1 відносно поворотної куліси 4.

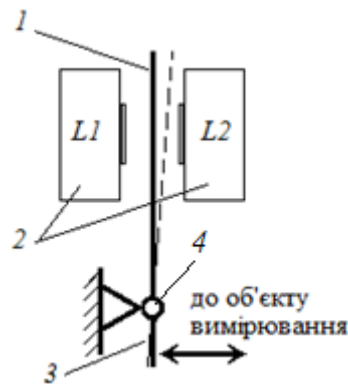


Рис. 1. Механічна частина диференційного індуктивного датчика

Пристрій працює таким чином. У рівноважному положенні якоря датчика, коли опори обмоток рівні, мостова схема знаходиться в стані балансу і величина струму в її вимірювальній діагоналі дорівнює нулю. Дія датчика заснована на перетворенні переміщення якоря в зміну індуктивності обмоток. При цьому величина струму  $I_0$  в вимірювальній діагоналі мостової схеми визначається таким виразом:

$$I_0 = u_2 \frac{Z_2 Z_3 - Z_1 Z_4}{Z_1 Z_2 Z_3 + Z_2 Z_3 Z_4 + Z_3 Z_4 Z_1 + Z_4 Z_1 Z_2}, \quad (1)$$

де:  $u_2$  – напруга джерела живлення;

$Z_1, Z_2$  – опір обмоток датчика;

$Z_3, Z_4$  – опори врівноважуючих плечей мостової схеми.

Вираз (1) може бути записано в такому вигляді:

$$I_0 = \frac{u_2(r_2 - r_1) + j(x_2 - x_1)}{A + jB}, \quad (2)$$

де  $A$  і  $B$  коефіцієнти:

$$A = \operatorname{Re}\{Z[(r_1 + r_2) + j(x_1 + x_2)]\} + 2(r_1 r_2 - x_1 x_2), \quad (3)$$

$$B = \operatorname{Im}\{Z[(r_1 + r_2) + j(x_1 + x_2)]\} + 2(r_1 x_2 + r_2 x_1), \quad (4)$$

де:  $x_1, x_2$  – реактивні опори обмоток датчика;

$r_1, r_2$  – активні опори обмоток датчика.

Помноживши чисельник і знаменник формули (2) на комплексну величину  $A - jB$ , маємо:

$$I_0 = u_2 \left[ \frac{A(r_2 - r_1) + B(x_2 - x_1)}{A^2 + B^2} + j \frac{A(x_2 - x_1) - B(r_2 - r_1)}{A^2 + B^2} \right] \quad (5)$$

Далі, помноживши чисельник і знаменник дійсної частини на  $1/B$ , а уявної частини на  $1/A$ , маємо:

$$I_0 = u_2 \left[ \frac{\frac{A}{B}(r_2 - r_1) + (x_2 - x_1)}{A^2 + B} + j \frac{(x_2 - x_1) - \frac{B}{A}(r_2 - r_1)}{A + B^2/A} \right] \quad (6)$$

Переміщення якоря датчика викликає, в основному, зміну реактивних опорів обмоток  $x_1$  і  $x_2$ , але має місце також зміна активних втрат в обмотках датчика, що характеризується наявністю різниці  $(r_2 - r_1)$  в формулах (2), (5) і (6) і веде до похибки вимірювання переміщення.

Похибка може бути зменшена шляхом вибору значень опорів врівноважуючих плечей  $Z$ . При виборі такого значення  $Z$ , що  $B \gg A$  на порядок більше, активна складова струму в формулі (6) пропорційна різниці  $(x_2 - x_1)$ , оскільки членом рівняння  $\frac{A}{B}(r_2 - r_1)$  можна знехтувати, зважаючи на його малість.

При значеннях добротності обмоток датчика, більших за одиницю, тобто при  $(x_2 x_1) \gg (r_2 r_1)$ , коли різниця  $(r_2 r_1 - x_2 x_1)$ , у формулі (3) від'ємна, для зменшення значення коефіцієнта  $A$  необхідно другий доданок у формулі (3) мати позитивним. Це може бути досягнуто застосуванням як врівноважуючих опорів  $Z$  активних опорів  $R$ . Формули (3) і (4) в цьому випадку приймають такий вигляд:

$$A = R(r_1 + r_2) + 2(r_1 r_2 - x_1 x_2), \quad (7)$$

$$B = R(x_1 + x_2) + 2(r_1 x_2 + r_2 x_1). \quad (8)$$

Чисельне значення  $R$  в більшості випадків достатньо визначати за формулою (7), мінімізуючи коефіцієнт  $A$  з урахуванням реальних опорів обмоток датчика  $r_1$ ,  $x_1$ ,  $r_2$  та  $x_2$  в рівноважному режимі моста при невідхиленому якорі датчика. Прирівнюючи у формулі (7)  $A = 0$ , отримуємо вираз для  $R$ :

$$R = \frac{2(x_1 x_2 - r_1 r_2)}{r_1 + r_2}. \quad (9)$$

Похибка вимірювання переміщень, викликана нестабільністю значень  $r_1$  та  $r_2$ , зменшується тим сильніше, чим більше значення коефіцієнта  $B$ , порівняно з коефіцієнтом  $A$ , що безпосередньо впливає з формули (6).

Структурна електрична схема пристрою зображена на рисунку 2, містить диференційний індуктивний датчик, обмотки якого  $L1$ ,  $L2$ , а також врівноважуючі опори  $Z1$  і  $Z2$ , джерело живлення – генератор сигналу синусоїдальної форми  $\Gamma$ , включений в діагональ живлення мостової схеми. Для формування сигналу вимірювання застосовано перетворювач різниці фаз опорного сигналу живлення з генератора  $\Gamma$  та сигналу з вимірювальної діагоналі мостової схеми. Підбір величин значень врівноважуючих опорів мінімізує похибку вимірювання переміщень шляхом зменшення впливу нестабільності активних опорів обмоток датчика.

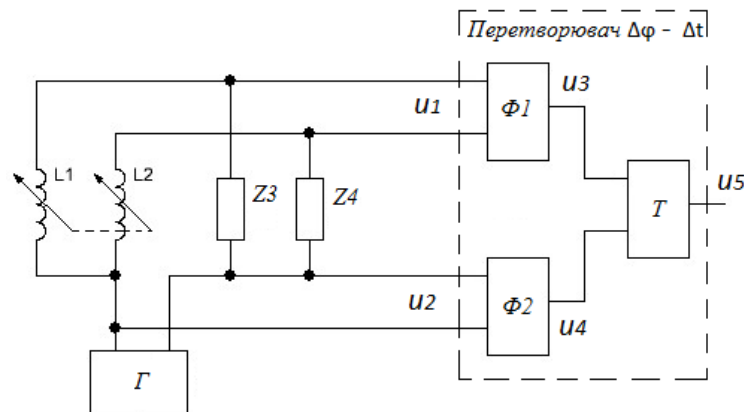


Рис. 2. Структурна схема вимірювача переміщення

Вимірювальна частина пристрою, яка перетворює переміщення в електричний сигнал, містить диференційний індуктивний датчик, обмотки  $L1$  і  $L2$  якого включені в два плеча мостової схеми, в два інших плеча включені врівноважуючі опори  $Z3$  і  $Z4$ . Джерело живлення  $\Gamma$  – генератор синусоїдального сигналу, включений в діагональ живлення мостової схеми. У вимірювальну діагональ мостової схеми включений формувач короткого імпульсу  $\Phi1$  по переходу сигналу  $u1$  через нуль. Для збільшення чутливості пристрою, формувач короткого імпульсу реалізовано на інтегральному компараторі з високим коефіцієнтом підсилення. Формувач короткого імпульсу  $\Phi2$  фіксує перехід опорної напруги живлення  $u2$  генератора  $\Gamma$  через нуль.

Епюри сигналів перетворення фазового зсуву в часовий інтервал для подальшої цифрової обробки показані на рисунку 3. Пристрій включає перетворювач  $\Delta\varphi \rightarrow \Delta t$  шуканого фазового зсуву  $\Delta\varphi$  в інтервал часу  $\Delta t$ . Перетворювач  $\Delta\varphi \rightarrow \Delta t$  має однакові формувачі  $\Phi1$  і  $\Phi2$  та тригер  $T$ . Синусоїдальні сигнали  $u1$  і  $u2$ , які мають деякий фазовий зсув  $\Delta\varphi$ , подають на ідентичні формувачі  $\Phi1$  і  $\Phi2$ , що перетворюють їх в послідовності коротких імпульсів  $u3$  і  $u4$ . Імпульси  $u3$  запускають, а імпульси  $u4$  скидають тригер  $T$  в початковий стан (рисунку 3). У результаті на виході тригера формують періодичну послідовність імпульсів напруги, період повторення і тривалість яких дорівнюють періоду  $\Gamma$  і зрушенню в часі  $\Delta t$  (різниця фаз) досліджуваних сигналів  $u1$  і  $u2$ .

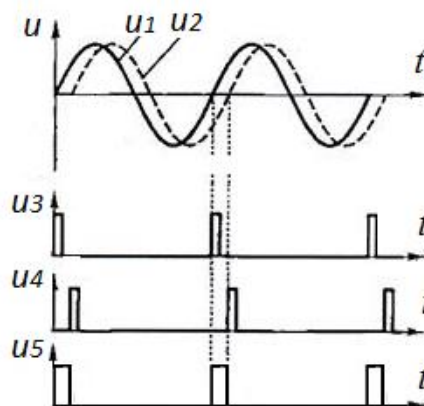


Рис. 3. Перетворення фазового зсуву в часовий інтервал (епюри сигналів)

В подальшому інтервал часу  $\Delta t$  (сигнал  $u_5$ ) легко піддається обробці комп'ютерними засобами або за допомогою логічних мікросхем можливо спроектувати автономний прилад для вимірювання переміщення контактним методом з цифровою шкалою відліку.

Проведено дослідження залежності чутливості датчика до переміщення при зміні частоти опорної напруги живлення моста при сталій амплітуді коливань  $u_2 = 5\text{ В}$ , яка задається генератором  $\Gamma$ . Результати дослідження наведені графіком на рисунку 4.

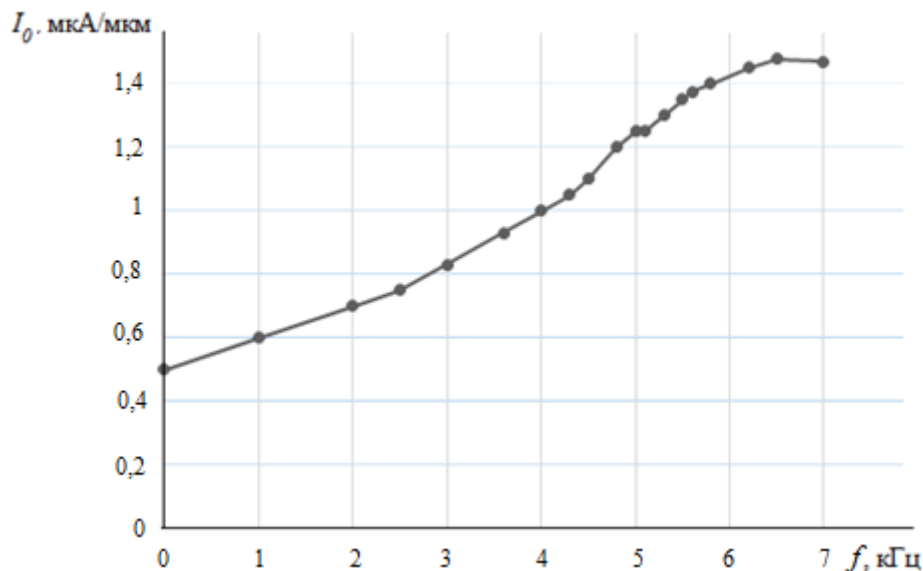


Рис. 4. Залежність чутливості датчика від частоти напруги живлення

Як видно з графіка залежність чутливості датчика від частоти опорної напруги має майже лінійний характер з деяким під'ємом починаючи з 4,5 кГц, що можна пояснити присутністю ємності об'ємного монтажу схеми, та має спад на частотах більших 6,5 кГц, що можна пояснити ростом реактивного опору індуктивних обмоток  $L1$  і  $L2$  датчика. Оптимальною частотою опорної напруги в даній реалізації є частота в 6,5 кГц.

**Висновки та перспективи подальших досліджень.** Проведені вимірювання параметрів пристрою показали, що його чутливість істотно залежить від частоти опорного сигналу генератора  $\Gamma$  (рисунку 2). Максимальна чутливість одержана при частоті генератора 6,5 кГц і становить 1,5 мкА/мм. Дослідження вимірювача на температурну стабільність показали, що температурна похибка становить не більше  $3 \times 10^{-3}$  мм/°С в діапазоні температур (5...45) °С.

Для подальшого підвищення точності вимірювання при виборі врівноважувачих опорів плечей мостової схеми з метою оптимальної мінімізації коефіцієнта  $A$ , необхідно у формулі (9) використовувати значення опорів обмоток індуктивного датчика не в рівноважному режимі, а з урахуванням їх можливих температурних змін у процесі роботи. При цьому зміна показань сигналу вимірювання пов'язана зі зміною тільки активної складової струму в вимірювальній діагоналі мостової схеми.

#### Список використаної літератури:

1. Агейкин Д.И. Датчики контроля и регулирования / Д.И. Агейкин, Е.Н.Костина, Н.Н.Кузнецов. – М. : Машиностроение, 1965. – 914 с.
2. Осадчий Е.П. Проектирование датчиков для измерения механических величин/ под ред. Е.П. Осадчего. – М. : Машиностроение, 1979. – 480 с.
3. Левшина Е.С. Электрические измерения физических величин: измерительные преобразователи / Е.С. Левшина, П.В. Новицкий. – Л. : Энергоатомиздат, 1983. – 320 с.
4. Тихоненков В.А. Теория, расчет и основы проектирования датчиков механических величин / В.А. Тихоненков, А.И. Тихонов. – Ульяновск : УлГТУ, 2000. – 452 с.
5. Панфилов Д.И. Электротехника и электроника в экспериментах и упражнениях : практикум на Electronics Workbench / под ред. Д.И. Панфилова. – М. : ДОДЭКА, 2000.
6. Шарпов В.М. Датчики : справочное пособие / под общ. ред. В.М. Шарпова, Е.С. Полищука. – Москва : Техносфера, 2012. – 624 с.
7. Аш, Ж. Датчики измерительных систем / Ж. Аш ; пер. с франц. – М. : Мир, 1992. – 480с.
8. Како Н. Датчики и микро-ЭВМ / Н.Како, Я.Яманэ ; пер. с япон. – Л. : Энергоатомиздат, 1986. –120 с.
9. Миляев Д.В. Аналоговые измерительные устройства: учебное пособие / Д.В. Миляев. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 251 с.

10. Бриндли К. Измерительные преобразователи : справочное пособие / К. Бриндли ; пер. с англ. – М. : Энергоатомиздат, 1991. – 144 с.

**References:**

1. Agejkin, D.I., Kostina, E.N. and Kuznecov, N.N. (1965), *Datchiki controlja i regulirovanija*, Mashunostroyenie, M., 914 p.
2. Osadchij, E.P. (ed) (1979), *Proektirovanie datchikov dlja izmerenija mehanicheskikh velichin*, Mashunostroyenie, M., 480 p.
3. Levschina, E.S. and Novickiy, P.V. (1983), *Elektricheskie izmereniya fizicheskikh velichin: izmeritelnye preobrazovateli*, Energoatomizdat, L., 320 p.
4. Tihonenkov, V.A. and Tihonov, A.I. (2000), *Teoriya, raschet i osnovyi proektirovaniya datchikov mehanicheskikh velichin*, UIGTU, Ulyanovsk, 452 p.
5. Panfilov, D.I. (2000), *Elektrotehnika i elektronika v eksperimentah i uprazhneniyah : praktikum na Elektronics Workench*, DODEKA, M.
6. Sharapov, V.M. and Polischuk, E.S.(2012), *Datchiki*, spravocnoe posobie, Tehnosfera, Moskva, 624 p.
7. Ash, Zh. (1992), *Datchiki izmeritelnyih sistem*, Translated by englis, Mir, M., 480 p.
8. Kako, N. and Yamane, Ya. (1986), *Datchiki i mikro-EVM*, Translated by japanese, Energoatomizdat, L., 120 p.
9. Milyaev, D.V. (2009), *Analogovye izmeritelnye ustroystva*, uchebnoe posobie, Izd-vo Tomskogo politehnicheskogo universiteta, Tomsk, 251 p.
10. Brindli, K. (1991), *Izmeritelnye preobrazovateli*, Translated by englis, spravocnoe posobie, Energoatomizdat, M., 144 p.

**Передерко** Анатолій Леонтійович – кандидат технічних наук, докторант Одеської державної академії технічного регулювання та якості

Наукові інтереси:

- Автоматизація технологічних процесів;
- Проектування первинних перетворювачів для вимірювання фізичних величин.

Стаття надійшла до редакції 08.04.2019.