

Розробка індуктивного датчика переміщення з високою чутливістю

А. Л. Передерко

Представлені дослідження контактного індукційного датчика переміщення на малі відстані. В якості датчика застосований феритовий сердечник з обмоткою та рухомим якорем. Між сердечником та якорем існує повітряний зазор.

Для вирішення завдання підвищення точності вимірювання датчик ввімкнутий в мостову вимірювальну схему, яка живиться змінним струмом високої частоти. Для підвищення чутливості вказаного датчика до переміщення запропонована диференційна схема його включення. Також, з метою підвищення чутливості, використаний резонансний режим роботи мостової схеми вимірювання. Для підтримання сталої напруги генератора живлення застосована схема фазового автоматичного підстроювання частоти.

В результаті дослідження індукційного датчика переміщення отримані практичні результати при максимальній величині переміщення в $\pm 0,6$ мм. На більші переміщення датчик не досліджувався, так як при збільшенні вказаного переміщення з'являється нелінійність перетворення переміщення-струм.

Отримана максимальна чутливість диференційного датчика в вказаному діапазоні переміщення в $2,44$ мкА/мкм без застосування системи фазового автоматичного підстроювання частоти.

Застосування системи фазового автоматичного підстроювання частоти дозволила підвищити чутливість до $3,48$ мкА/мкм.

В ході дослідження була визначена залежність чутливості датчика від частоти генератора живлення, що дозволило визначити оптимальну частоту живлення вимірювальної мостової схеми.

Проведені дослідження показали, що використання контактних індуктивних вимірювачів мають перспективу застосування і резерви по вдосконаленню. А використання диференційного включення датчика та резонансний режим роботи дає суттєве підвищення чутливості первинного перетворювача на малих переміщеннях.

Розроблений недорогий датчик буде корисний для багатьох застосувань, де необхідно вимірювати переміщення і лінійні розміри контактними методами

Ключові слова: лінійність перетворення, контактний датчик переміщення, індуктивний датчик, феритовий магнітопровід

1. Вступ

Сучасний розвиток технічних систем тісно пов'язаний з необхідністю точного вимірювання переміщення об'єктів і вимірюванням лінійних розмірів до них. Різноманіття областей використання вимірювачів лінійних переміщень і відстаней, постійне зростання вимог до точності датчиків, діапазону вимірюваних величин, а також спрямованість на вирішення конкретних практичних за-

вдань, кількість яких невпинно зростає. Це дозволяє говорити про те, що розробка і дослідження нових вимірювачів лінійних переміщень і 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). Також забезпечується точне позиціонування окремих вузлів складальних одиниць при їх складанні у точному приладобудуванні, точне функціональне позиціонування рухомих елементів прецизійних систем, калібрування і юстирування механічних метрологічних приладів і т. д.

Сьогодні технічні галузі вимагають мікронних та субмікронних точностей до якості виготовлення окремих деталей виробів і до контролю просторового положення їх вузлів. Це створює необхідність розробки і дослідження нових типів датчиків лінійних вимірювань, що відрізняються простотою конструкції і невисокою ціною.

З відомих високоточних методів вимірювання лінійних переміщень можна виділити індуктивні контактні датчики.

Індуктивні датчики є первинними перетворювачами параметричного типу, принцип дії яких заснований на зміні індуктивності або взаємної індуктивності обмотки з феромагнітним сердечником, внаслідок зміни магнітного опору магнітного ланцюга датчика, в який входить сердечник. Вони знайшли широке застосування в метрології та промисловості для вимірювання переміщень. Індуктивні датчики покривають діапазон вимірювань від 0,1 мкм до 20 мм. Також можливе використання індуктивних датчиків для вимірювання тиску, сили та рідини і т. ін.

Індуктивні датчики застосовуються як на стадії виробництва, так і при експлуатації приладів.

Все це дозволяє говорити про те, що розробка і дослідження нових вимірювачів лінійних переміщень і вимірювачів відстаней, а також удосконалення існуючих датчиків, є актуальним завданням.

2. Аналіз літературних джерел і постановка проблеми

Вимірюванням лінійних переміщень присвячено багато уваги. Так, в статті [1] представлений датчик індуктивного переміщення на основі плоскої спіральної котушки. У пропонованому датчику використовується фіксована плоска котушка і рухливий П-подібний магнітопровід. Внаслідок його вдосконалення автором розроблений диференційний датчик з використанням двох наборів котушок. Диференційний датчик, по заяві авторів, має високу чутливість у всьому діапазоні, на відміну від першого прототипу. Але в даній роботі не відзначено вплив форми магнітопроводу на роботу диференційної схеми.

Аналізуючи матеріали роботи [2], в якій розглянуті контактні методи переміщень, приходимо до висновку, що незважаючи на прогрес у розвитку безконтактних засобів вимірювання переміщень, зокрема оптичних та лазерних, повна заміна ними засобів вимірювання переміщень контактним методом неможлива. Це пов'язане з тим, що безконтактні засоби вимірювання не дозволяють виключити вплив на точність вимірювань поверхневого шламу, окисної плівки і т. п.

Відомо, що індуктивні котушки, що мають магнітний сердечник, через нелінійну характеристику намагнічування матеріалу сердечника мають нелінійну вольт-амперну характеристику і генерують в ланцюгах, в які вони включені, вищі гармоніки струму [3]. Тому на практиці найбільш широкого поширення набули датчики з лінійними характеристиками, які мають в магнітному ланцюгу немагнітні зазори (рис. 1) [4]. В цьому випадку магнітний опір сердечника визначається в основному магнітним опором зазорів, тому нелінійність магнітної характеристики сердечника практично не впливає на протікаючий по котушці струм, який при синусоїдальній напрузі живлення також буде практично синусоїдальним. Тому індуктивні котушки з повітряним зазором мають практично лінійні характеристики.

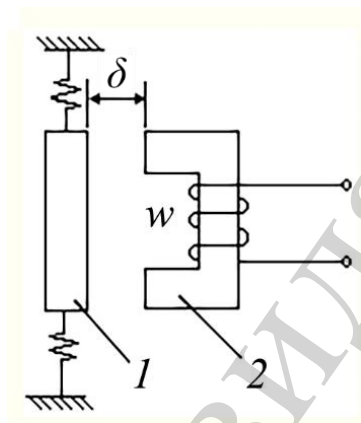


Рис. 1. Схема індуктивного перетворювача з рухомим якорем

Параметричні датчики зі змінною індуктивністю (рис. 1) представляють собою індуктивну котушку з феромагнітним сердечником 2. Індуктивність котушки L змінюється в залежності від переміщення якоря 1, в результаті чого змінюється повітряний зазор δ в магнітопроводі індуктивної котушки.

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 знаходяться врівноважуючі опори [5]. Як правило, у вимірювальну діагональ мостової схеми включається індикатор сигналу з великим входним опором. Для додання 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 висвітлювались в публікаціях низки авторів. Разом з тим в цих роботах не досліджували вплив багатьох факторів, які мають місце при проведенні вимірювань переміщень.

У статті [6] представлений індуктивний датчик переміщення, який використовується для виявлення невеликих переміщень (менше 0,5 мм) в одній площині. Описано конструкцію, реалізацію та вимірювання входної індуктивності датчика. Для досягнення кращої лінійності датчика поздовжні магнітні зазори вставляють-

ся в середину кожного сегмента однієї нерухомої котушки. Автори вказують на нелінійність при збільшенні повітряного зазору понад 0,5 мм.

В джерелі [7] систематизовані довідкові матеріали по датчикам технологічних величин: переміщення, прискорень, а також параметрів вібрацій. Але не достатньо висвітлені питання чутливості датчиків до вимірюваних величин. В джерелі [8] авторами представлено новий ефективний датчик переміщення з використанням плоских котушок без сердечника, які мають магнітний зв'язок. Датчик складається з двох плоских нерухомих котушок і однією рухомою котушки. Взаємна індуктивність між нерухомими котушками і рухомими котушками вимірюється, і обчислюється переміщення. Але в даній роботі не розглянуті питання конструктивних особливостей необхідних при проектуванні механічної частини датчика. В [9] запропонований пристрій, який відрізняється від стандартних схем індуктивного датчика тим, що чутлива котушка збуджується електромагнітним полем, створюваним виконавчою котушкою, а не зовнішнім генератором. Електромагнітний потік, пов'язаний з чутливою котушкою, функціонує в режимі зміни відстані між датчиком і об'єктом, яку необхідно виміряти. Так конструкція датчика дуже чутлива до зовнішніх електромагнітних завад.

В [10] авторами розглянуті питання оцінки і розрахунку чутливості і швидкодії тільки пружних елементів механічних датчиків. В [11] викладені теоретичні основи, принципи дії, описані конструкції і характеристики датчиків фізичних величин в загальному виді, без висвітлення детальних особливостей які необхідно враховувати при проектуванні індуктивних датчиків переміщення.

Відзначимо, що у розглянутих джерелах мало уваги приділено питанням залежності чутливості від матеріалу та форми сердечника. Також залишилося відкритим питання резонансних режимів роботи схеми вимірювання та вплив нестабільності частоти напруги живлення індуктивних датчиків переміщення на результати вимірювання.

3. Мета і завдання дослідження

Метою дослідження є вивчення впливу немагнітного зазору на чутливість перетворення індукційного датчика лінійних переміщень. Це дасть можливість підвищення чутливості контактної індукційного датчика лінійних переміщень для систем вимірювання механічних величин.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

- застосувати диференційну схему включення та резонансний режим роботи індукційного датчика для підвищення чутливості індукційного датчика до переміщення;

- застосувати мостову вимірювальну схему з живленням змінним струмом високої частоти;

- використати систему фазового автоматичного підстроювання частоти (ФАПЧ) для підтримання сталого резонансного режиму роботи вимірювальної схеми в її ланцюгу живлення

4. Матеріали та методи дослідження диференційного датчика лінійних переміщень

Диференціальні (реверсивні) індуктивні датчики являють собою сукупність двох одинарних датчиків із загальним якорем. Диференціальні індуктивні датчики мають реверсивну статичну характеристику і в них присутня взаємна компенсація електромагнітної сили тяжіння якоря.

Механічна частина запропонованого датчика представлена на рис. 2.

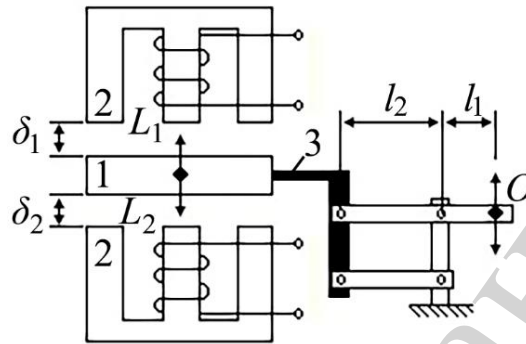


Рис. 2. Механічна частина диференційного індуктивного датчика

Котушки індуктивностей L_1 та L_2 розміщені на двох Ш-подібних феритових магнітопроводах 2, встановлених з зазором. В зазорі між магнітопроводами розміщений якорь 1, виготовлений у вигляді пластини з феромагнітного матеріалу. Якорь 1 механічно пов'язаний з коромислом 3, яке переміщується під дією сил, прикладених до точки O з боку об'єкта вимірювання. Кулісний механізм передачі руху від точки O до коромисла 3 побудований так, що якорь 1 рухається строго перпендикулярно Ш-подібним магнітопроводам 2. Важелі куліси мають високу власну жорсткість, що дозволяє побудувати мультиплікатор передачі переміщення від об'єкта вимірювання (точка O) до переміщення якоря 1 як відношення плеч l_1 та l_2 .

5. Застосування диференційної схеми включення та резонансного режиму роботи індукційного датчика.

Котушки L_1 та L_2 індуктивного датчика включені в плечі вимірювального моста змінного струму. В протилежні плечі моста включені конденсатори. Розрахункова схема вимірювального моста наведена на рис. 3.

Пристрій працює наступним чином. У рівноважному положенні якоря датчика, коли опори обмоток рівні, мостова схема знаходиться в стані балансу і величина струму I_0 в її вимірювальній діагоналі дорівнює нулю.

При механічній дії зі сторони об'єкта вимірювання, прикладеній до точки O , через важелі і коромисло 3 датчика (рис. 2) відбувається переміщення якоря 1, що приводить до зміни немагнітних зазорів і індуктивності обмоток, причому ці зміни будуть асиметричні:

$$\begin{cases} \delta_1 = (\delta_2 \pm \Delta\delta), \\ \delta_2 = (\delta_1 \mp \Delta\delta). \end{cases}$$

Коли змінюються немагнітні зазори між котушками і якорем, то змінюються вихрові магнітні струми сердечників 1, 2. Це викликає зміну імпедансу котушок Z_1 і Z_2 :

$$\begin{cases} Z_1 = R_{1\delta}(\delta_1 \pm \Delta\delta) + j\omega L_1(\delta_1 \pm \Delta\delta), \\ Z_2 = R_{2\delta}(\delta_2 \pm \Delta\delta) + j\omega L_2(\delta_2 \pm \Delta\delta), \end{cases}$$

де, $\omega = 2\pi f$ (f – частота напруги живлення моста, R – активний опір котушки).

При чому при збільшенні імпедансу Z_1 імпеданс Z_2 зменшується і навпаки. Це конструктивне рішення теоретично, як видно з (1), дає змогу підвищити чутливість вимірювальної схеми до переміщення за рахунок збільшення струму I_0 в два рази.

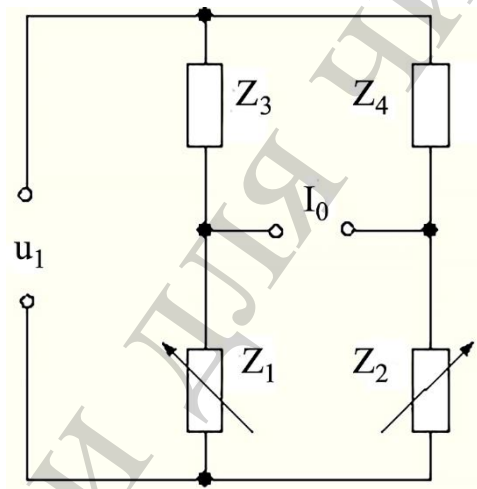


Рис. 3. Розрахункова схема вимірювального моста

Величина струму I_0 в вимірювальній діагоналі мостової схеми визначається наступним виразом:

$$I_0 = u_1 \frac{Z_2 Z_3 - Z_1 Z_4}{Z_1 Z_2 Z_3 + Z_2 Z_3 Z_4 + Z_3 Z_4 Z_1 + Z_4 Z_1 Z_2}, \quad (1)$$

де: u_1 – напруга джерела живлення; Z_1, Z_2 – імпеданси обмоток датчиків; Z_3, Z_4 – імпеданси врівноважуючих плечей мостової схеми (рис. 3).

При чому:

$$Z_1 = R_{L1} + jX_{L1}, \quad Z_2 = R_{L2} + jX_{L2}, \quad Z_3 = Z_4 = R_C + jX_C,$$

де R_C – активний опір ізолятора між обкладинками, від якого залежить струм витоку ємності.

6. Застосування мостової вимірювальної схеми з живленням змінним струмом високої частоти

Проведемо дослідження роботи схеми рис. 3 при живленні змінним струмом.

Вираз (1) може бути записано в наступному вигляді:

$$I_0 = \frac{u_1(r_2 - r_1) + j(x_2 - x_1)}{A + jB}. \quad (2)$$

Де A і B коефіцієнти:

$$A = \operatorname{Re}\{Z\} = [(r_1 + r_2) + j(x_1 + x_2)] + 2(r_1r_2 - x_1x_2); \quad (3)$$

$$B = \operatorname{Im}\{Z\} = [(r_1 + r_2) + j(x_1 + x_2)] + 2(r_1x_2 - r_2x_1). \quad (4)$$

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:

$$I_0 = u_1 \left[\frac{A(r_2 - r_1) + B(x_2 - x_1)}{A^2 + B^2} + j \frac{A(x_2 - x_1) - B(r_2 - r_1)}{A^2 + B^2} \right]. \quad (5)$$

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

$$I_0 = u_1 \left[\frac{\frac{A}{B}(r_2 - r_1) + (x_2 - x_1)}{A^2 + B} + j \frac{(x_2 - x_1) - \frac{B}{A}(r_2 - r_1)}{A + B^2/A} \right]. \quad (6)$$

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 призводить до появи похибки вимірювання переміщення.

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

При значеннях добротності обмоток датчика, більших одиниці, тобто при $(x_2x_1) \gg (r_2r_1)$, коли різниця $(r_2r_1 - x_2x_1)$, в формулі (3) від'ємна, то для зменшення значення коефіцієнта A , необхідно другий доданок у формулі (3) мати позитивним. Це може бути досягнуто застосуванням в якості врівноважують опорів Z активних опорів R . Формули (3) і (4) в цьому випадку приймають такий вигляд:

$$A = R(r_1 + r_2) + 2(r_1r_2 - x_1x_2), \quad (7)$$

$$B = R(x_1 + x_2) + 2(r_1x_2 - r_2x_1). \quad (8)$$

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 :

$$R = \frac{2(x_1x_2 - r_1r_2)}{r_1 + r_2}. \quad (9)$$

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).

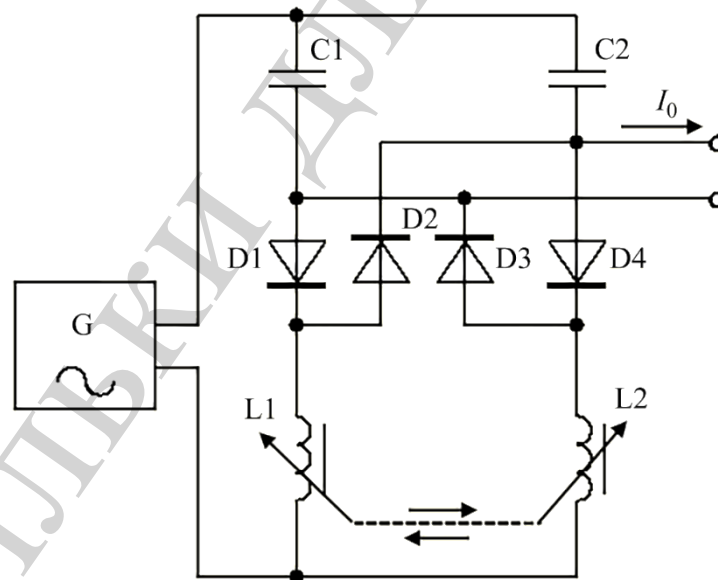


Рис. 4. Структурна схема вимірювача переміщення

Структурна електрична схема пристрою зображена на рис. 4 і містить диференційний індуктивний датчик, обмотки якого $L1, L2$, а також врівноважуючі імпеданси $Z1$ і $Z2$ (ємкості $C1$ та $C2$ відповідно). Джерело живлення – генератор сигналу синусоїдальної форми G , включений в діагональ живлення мостової схеми. Для формування сигналу вимірювання застосовано перетворювач на ді-

одах $D1 \dots D4$ (кільцевий детектор) [13, 14]. Підбір величин значень опорів мінімізує похибку вимірювання переміщень шляхом зменшення впливу нестабільності активних опорів обмоток датчика та врівноважує мостову схему на нульовій відмітці.

Вимірювальна частина пристрою, яка перетворює переміщення в електричний сигнал, містить диференційний індуктивний датчик. Обмотки $L1$ і $L2$ датчика включені в два плеча мостової схеми. В два інших плеча включені ємності $C1$, $C2$ (імпеданси $Z3$ і $Z4$). Джерело живлення G – генератор синусоїдального сигналу, включений в діагональ живлення мостової схеми [11, 12].

При розбалансуванні мостової схеми в діагоналі вимірювання починає протікати струм I_0 , який пропорційний зміні немагнітних зазорів на сердечниках $L1$ і $L2$.

Проведено дослідження залежності чутливості датчика до переміщення при зміні частоти опорної напруги живлення моста при сталій амплітуді коливань $u_1=5$ В, яка задається генератором G . Результати дослідження наведені графіком на рис. 5.

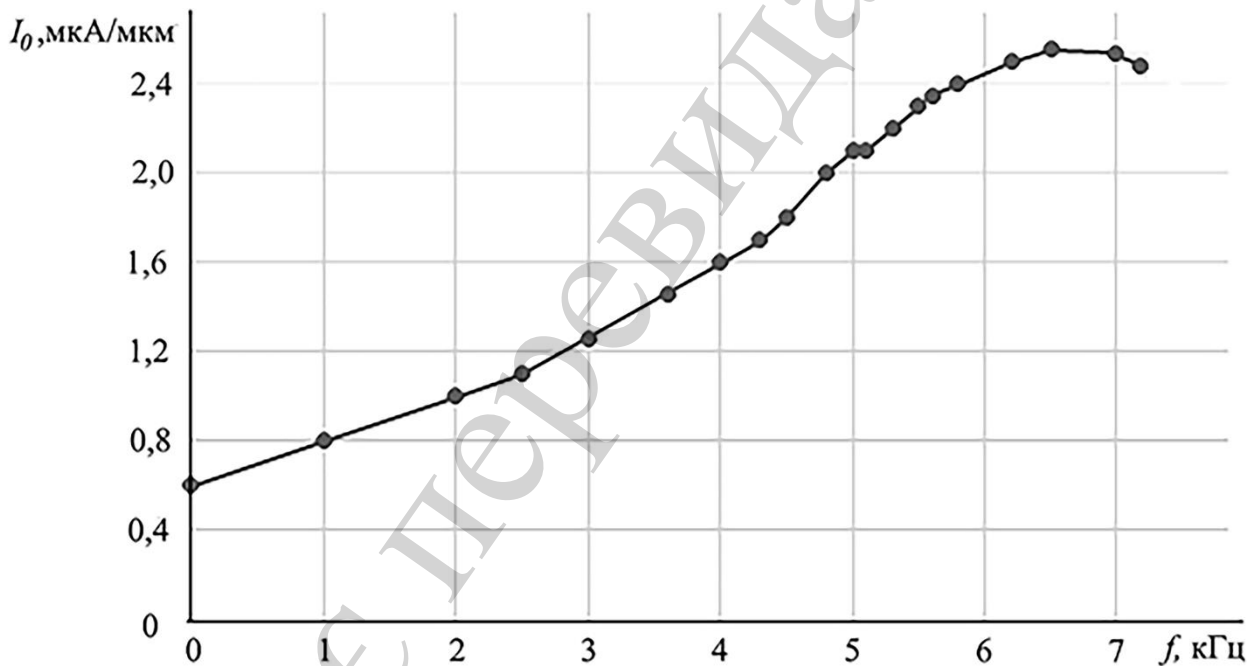


Рис. 5. Залежність чутливості вимірювача при зміні частоти напруги живлення.

Як видно з графіка (рис. 5) залежність чутливості датчика від частоти опорної напруги має майже лінійний характер з деяким підйомом починаючи з 4,5 кГц. Це можна пояснити присутністю ємності об'ємного монтажу схеми. Також чутливість 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.

Аналізуючи роботу даної схеми вимірювання на предмет сталої роботи прослідковується її залежність від напруги живлення та температури.

Необхідно відмітити, що, для порівняння, було проведено дослідження залежності чутливості моно датчика (рис. 1) до переміщення при зміні частоти опорної напруги живлення при сталій амплітуді коливань $u_1=5$ В. Максимальна чутливість датчика одержана на частоті генератора 5,3 кГц становила 1,37 мкА/мкм.

7. Застосування ФАПЧ в схемі живлення вимірювального моста

Вимірювальний міст змінного струму з LC елементами має найбільшу чутливість, в резонансному режимі роботи. Тобто коли частота напруги живлення співпадає з власною резонансною частотою контурів моста. Так як генератор живлення схеми моста працює на LC навантаження, то має місце зміщення фаз між напругою та током.

Для запобігання цьому в схемі живлення моста застосована ФАПЧ. Структурна схема ФАПЧ наведена на рис. 6.

Основними елементами системи ФАПЧ є фазовий детектор (ФД), на входи якого через компаратори (спрацьовують при переході сигналу через нуль) подаються керуючі сигнали. Різниця фаз цих сигналів є зміщенням фаз між напругою та струмом живлення. ФД формує сигнал керування і через фільтр нижніх частот (ФНЧ) подає його на генератор, що керується напругою (ГКН). ГКН під дією сигналу керування підлаштовує частоту живлення. Відбувається збалансованість фаз напруги та струму.

Необхідно відмітити, що ФНЧ, який включається між виходом ФД і входом ГКН, визначає багато в чому частотні властивості ФАПЧ [14].

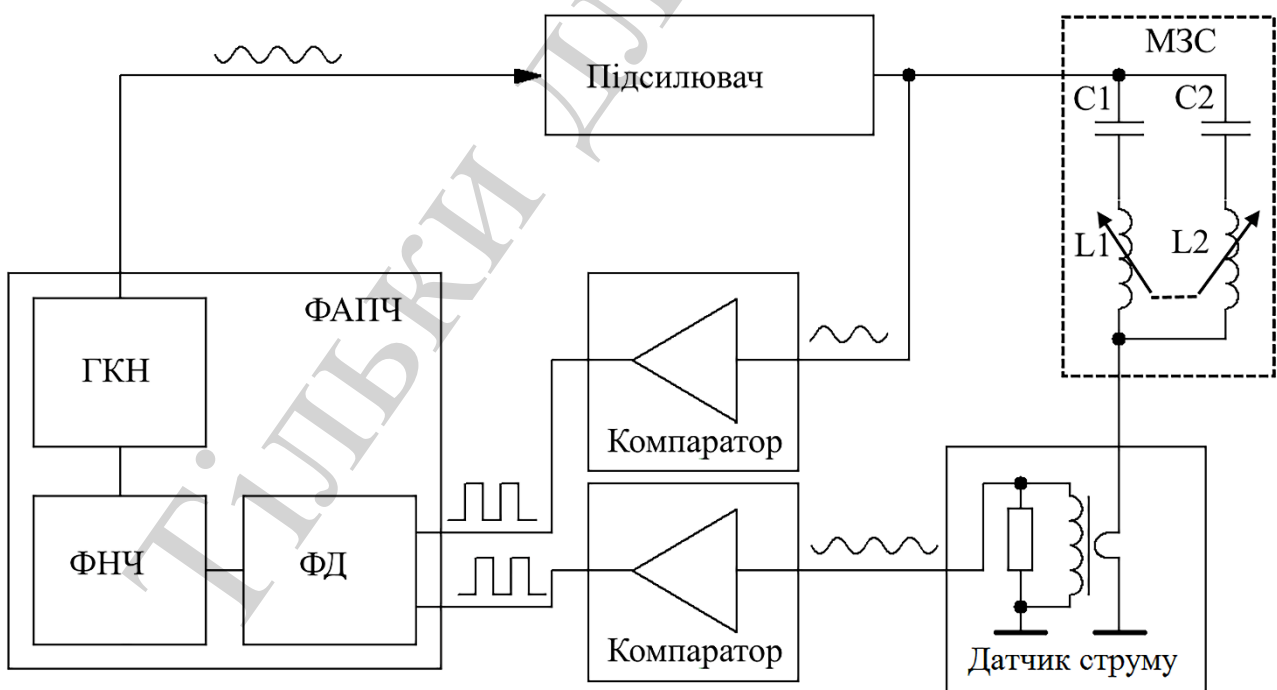


Рис. 6. Структурна схема ФАПЧ.

На рис. 7, 8 наведені напруги в діагоналі вимірювання (осцилограма 1) та в ланцюгу живлення (осцилограма 2). На рис. 7 схема працює без системи ФАПЧ

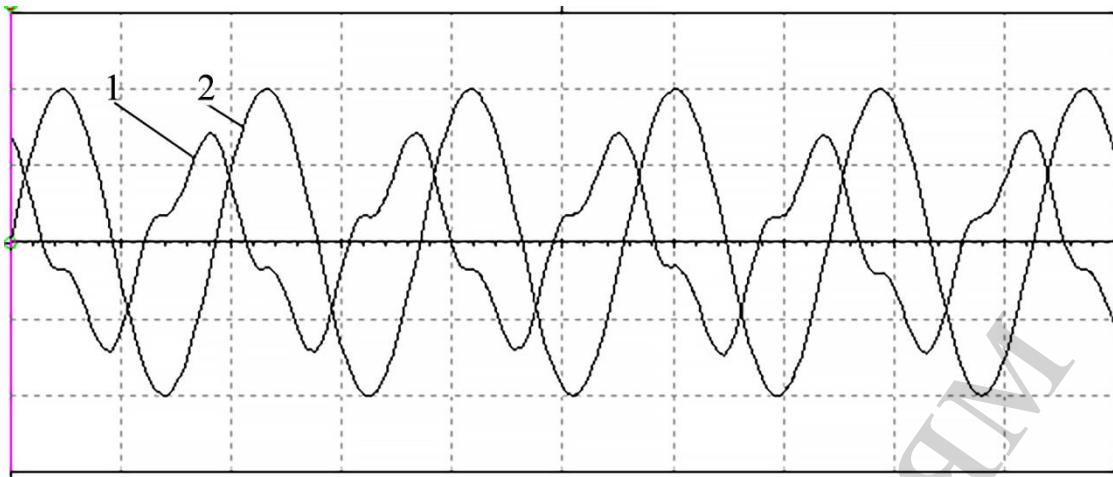


Рис. 7. Напряга в ланцюгу вимірювання 1 та в ланцюгу живлення 2 без ФАПЧ

На рис. 8 система ФАПЧ присутня.

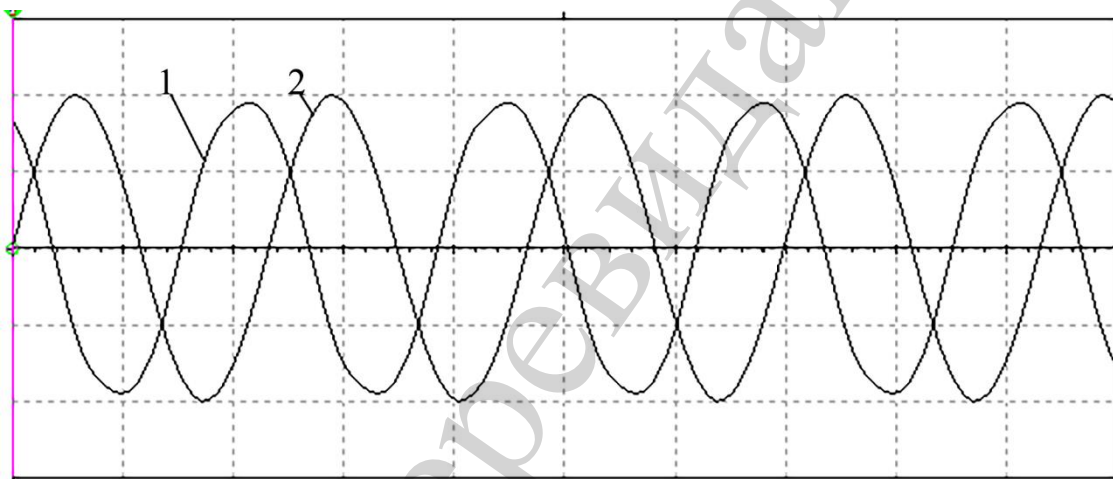


Рис. 8. Напряга в ланцюгу вимірювання 1 та в ланцюгу живлення 2 з ФАПЧ

Проведено дослідження залежності чутливості датчика до переміщення при зміні частоти опорної напруги живлення моста при сталій амплітуді коливань $u_1=5$ В, яка задається генератором G з ФАПЧ. Результати дослідження наведені графіком на рис. 9.

Оскільки переміщення якоря 1 (рис. 2) від нейтрального положення викликає збільшення індуктивності однієї з обмоток і зменшення індуктивності в іншій на одне і те ж значення, резонансна частота діагоналі живлення моста змінюється мало. Тобто система ФАПЧ працює в вузькому коридорі фазових зсувів.

При роботі схеми ФАПЧ в ланцюгу живлення вимірювального моста досягнуто збільшення діапазону лінійного переміщення на $\pm 0,1$ мм.



Рис. 9. Залежність чутливості вимірювача при зміні частоти напруги живлення з ФАПЧ

8. Обговорення результатів дослідження диференційного індуктивного датчика лінійних переміщень

Висока чутливість та лінійність перетворення індукційного датчика отримані в результаті застосування диференційної схеми включення та роботи вимірювального моста в резонансному режимі.

Необхідно відмітити переваги застосованого в диференційному датчику Ш-подібного сердечника (рис. 2) замість П-подібного сердечника (рис. 1). Котушка на Ш-подібному сердечнику розміщується на центральній ніжці і лінії магнітного потоку симетрично проходять через обидві бокові ніжки сердечника врівноважуючи одна одну. Це дає змогу формувати симетричну магнітну дію на якір. В диференційній схемі включення датчика (рис. 2), де якір повинен рухатися строго по нормалі до сердечників, це позитивно впливає на точність витримки немагнітних зазорів і, як наслідок, на точність вимірювання.

Отримані значення чутливості диференційного індуктивного датчика лінійних переміщень досягнуті в діапазоні переміщень не більше $0 \dots \pm 0,6$ мм. Це обумовлено тим, що більші переміщення приводять до нелінійності перетворення переміщення-струм. Вказане явище пояснюється нелінійним законом розсіювання магнітного потоку в зоні немагнітних (повітряних зазорів) диференційного датчика (втрати на вихрові струми).

Вказаний вузький діапазон переміщень певним чином вносить обмеження на сфери застосування датчика.

Додатково потрібно відмітити можливість доповнення механічної частини датчика системою важелів при передачі вимірюваного переміщення від об'єкту вимірювання (рис. 2). Важільні схеми датчиків дають змогу сконструювати системи для багатодіапазонних вимірювань. Результати досліджень показують, що при вимірюваннях мікронних переміщень важільні схеми датчиків вносять

велику похибку в результат вимірювання. Тому більшість конструкцій прецизійних важільних датчиків має один передавальний важіль.

Похибка при застосуванні одного важеля складає:

$$\Delta = \frac{\sigma + y}{n},$$

де $n = \frac{l_2}{l_1}$ – передавальні відносини першого і другого плеча важеля; σ – похибка геометричних розмірів виготовлення першого і другого плеча; y – похибка контактної пари (похибка настройки). Ця похибка буде адитивною складовою в загальній похибці вимірювання.

На підставі результатів експерименту також встановлено, що при різних значеннях напруги живлення, характеристики залежності вихідного струму від переміщення якоря перетинаються в точці, яка не співпадає з початком координат. На графіку рис. 5 початковий ток 6 мкА, а графіку рис. 9 початковий ток 2 мкА. Це говорить про те, що при симетричному положенні якоря струм в вимірювальній діагоналі моста не дорівнює нулю. Головна причина появи струму при нейтральному положенні якоря – несиметрія параметрів обмоток $L1$ та $L2$, що призводить до нерівності активних і реактивних опорів котушок.

Додаткові дослідження вимірювача на температурну стабільність показали, що температурна похибка складає $3 \cdot 10^{-3}$ мм/°С в діапазоні температур (5...40) °С.

Тому, для подальшого підвищення точності вимірювання, необхідно провести пошуки шляхів температурної стабілізації датчика. В подальшому слід також провести теоретичні і експериментальні оцінки швидкодії (інерційності) запропонованого диференційного датчика на предмет можливості вимірювання ним низькочастотних вібрацій.

8. Висновки

Запропонований індуктивний датчик лінійних переміщень відрізняється від відомих конструктивними рішеннями механічної частини та застосування в схемі живлення вимірювального моста змінного струму системи ФАПЧ.

1. Для збільшення чутливості електромагнітного ланцюга до переміщення датчик побудовано по диференційній схемі. Проведені вимірювання параметрів пристрою показали, що диференційна схема побудови датчика підвищує його чутливість в 1,78 раз порівняно з монодатчиком за схемою індуктивного перетворювача з рухомим якорем.

2. Застосування мостової вимірювальної схеми дає максимальну чутливість 2,44 мкА/мкм при частоті генератора 6,5 кГц.

3. Застосування ФАПЧ в ланцюгу живлення вимірювального моста дало збільшення чутливості. Чутливість одержана на частоті генератора 5,3 кГц збільшилась в 1,43 рази і становить 3,48 мкА/мкм. Додатково відзначено збільшення діапазону лінійності в 1,2 рази (до $\pm 0,6$ мм) та підвищення стабільності в роботі схеми. Також покращився показник повторюваності результатів вимірювання.

Література

1. Babu, A., George, B. (2018). Design and Development of a New Non-Contact Inductive Displacement Sensor. *IEEE Sensors Journal*, 18 (3), 976–984. doi: <https://doi.org/10.1109/jsen.2017.2780835>
2. Леун, Е. В. (2018). Вопросы построения зондовых приборов активного контроля размеров изделий. *Омский научный вестник*, 4 (160), 127–133. doi: <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2018-160-127-133>
3. Трофимов, А. А., Рязанцев, Д. А. (2016). Датчик линейных перемещений для систем измерения ракетно-космической техники. *Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль*, 4 (18), 52–57.
4. Fericean, S. (2019). *Inductive Sensors for Industrial Applications*. Artech House Publishers.
5. Winncy, Y. Du. (2014). *Resistive, Capacitive, Inductive, and Magnetic Sensor Technologies*. CRC Press, 408. doi: <https://doi.org/10.1201/b17685>
6. Damnjanovic, M. S., Zivanov, L. D., Nagy, L. F., Djuric, S. M., Biberdzic, B. N. (2008). A Novel Approach to Extending the Linearity Range of Displacement Inductive Sensor. *IEEE Transactions on Magnetics*, 44 (11), 4123–4126. doi: <https://doi.org/10.1109/tmag.2008.2002801>
7. Hruškovic, M., Hribik, J. (2008). Digital Capacitance and Inductance Meter. *Measurement Science Review*, 8 (3), 61–64. doi: <https://doi.org/10.2478/v10048-008-0016-9>
8. Anandan, N., George, B. (2017). Design and Development of a Planar Linear Variable Differential Transformer for Displacement Sensing. *IEEE Sensors Journal*, 17 (16), 5298–5305. doi: <https://doi.org/10.1109/jsen.2017.2719101>
9. Bonfitto, A., Gabai, R., Tonoli, A., Castellanos, L. M., Amati, N. (2019). Resonant inductive displacement sensor for active magnetic bearings. *Sensors and Actuators A: Physical*, 287, 84–92. doi: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2019.01.011>
10. Тихоненков, В. А., Тихонов, А. И. (2000). Теория, расчет и основы проектирования датчиков механических величин. Ульяновск: УлГТУ, 452.
11. Шарапов, В. М., Полищук, Е. С. (Ред.) (2012). *Датчики*. Москва: Техносфера, 624.
12. Кощук, Г. А., Тихонов, И. А., Косарев, Б. А. (2019). Оптимизация фазовой автоподстройки частоты синтезатора частот. *Омский научный вестник*, 3 (165), 28–32. doi: <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2019-165-28-32>