



УКРАЇНА

(19) UA

(11) 62011

(13) C2

(51) 7 G01B7/00

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ
І НАУКИ УКРАЇНИДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІОПИС
ДО ПАТЕНТУ НА ВИНАХІД

(54) СПОСІБ ВИМІРЮВАННЯ МАЛИХ ПЕРЕМІЩЕНЬ З ДОВІЛЬНОЮ ШВИДКІСТЮ РУХУ

1

2

(21) 2001063855

(22) 07 08 2001

(24) 15 12 2003

(46) 15 12 2003, Бюл. № 12, 2003 р.

(72) Бех Александр Дмитриевич, Чернецький Віктор Васильович, Кардашук Михайло Дмитрович

(73) ІНСТИТУТ КІБЕРНЕТИКИ ІМ В.М. ГЛУШКОВА НАН УКРАЇНИ

(56) 3-ка ФРН №3929681 G01 B 7/02 14 03 1991

(57) Спосіб вимірювання малих переміщень з довільною швидкістю руху на основі перетворення переміщення об'єкта в модуляцію магнітного потоку шляхом відносного переміщення частин магнітопроводу, який полягає в створенні електричним струмом зовнішнього джерела гармонічної ЕРС магнітного потоку, модуляції величини магнітного

потоку, перетворенні модуляції магнітного потоку в інформаційний сигнал, квантуванні інформаційного сигналу і оцінці переміщення по кількості квантів, який відрізняється тим, що створюють мінімальний магнітний опір магнітному потоку, встановлюють частоту зовнішнього джерела гармонічної ЕРС рівною частоті енергетичного резонансу в електромагнітній системі магнітопровід-провідник, перетворюють модуляцію магнітного потоку в фазовий зсув струму в провіднику відносно фази гармонічної ЕРС, перетворюють фазовий зсув гармонічного сигналу струму в часовий інтервал, який дискретизують, квантують і перетворюють в цифрове значення, по якому визначають величину переміщення

Спосіб вимірювання малих переміщень відноситься до вимірювальної техніки і може застосовуватись в пристроях та системах, які використовують цифрові значення відстані при довільній швидкості руху

Вимірювання малих лінійних і кутових переміщень дуже поширені і використовуються в машинобудуванні, механіці, геодезії, військовій справі, астрономії та ін. Наприклад, в машинобудуванні вони складають 80% від усіх вимірювань, які використовуються. Широке розповсюдження методів вимірювання малих переміщень обумовлене тим, що на їх основі побудовані вимірювачі механічних напруг, сил, моментів, тиску, параметрів руху та ін.

Існує багато способів вимірювання переміщень. Це і електромеханічні, електрофізичні, спектрометричні та інші способи. Основним недоліком майже усіх способів вимірювання переміщень з довільною швидкістю в реальному часі є невисока цифрова чутливість. В одному з відомих способів вимірювання малих переміщень використовуються процеси магнітної або електричної індукції для перетворення руху в індукований електричний сигнал [Домрачев и др. Схемотехника цифровых преобразователей перемещений. Справочное пособие. -М. Энергоиздат, 1987. 392 с]. Відповідно до цього способу переміщення перетворюється

в напругу, амплітудне значення якої пропорційне швидкості переміщення. Величину переміщення у вигляді аналогового сигналу одержують в результаті операції інтегрування аналогового сигналу швидкості. Аналоговий сигнал переміщення дискретизують і квантують. По кількості квантів судять про величину переміщення.

Основний недолік способу електричної або магнітної індукції полягає в тому, що висока цифрова чутливість вимірювання переміщення досягається тільки при високій швидкості відносного руху, яка перевищує деяку порогову, тому що амплітуда напруги пропорційна швидкості при індукційному перетворенні руху. При швидкості руху нижче порогової чутливість визначення цифрових значень відстані зменшується до нульової. Це обмежує застосування динамічного способу перетворення переміщень лише високочастотними механічними процесами, наприклад акустичними.

Причиною, яка не дозволяє аналогу досягти поставленої мети збільшення цифрової чутливості і точності вимірювання переміщення є залежність чутливості від швидкості переміщення, яка обмежена знизу порогом швидкості відносного руху.

Способи вимірювання малих переміщень з довільною швидкістю відомі. Ознакою відомих способів є процес перетворення переміщень в зміну

(13) C2

(11) 62011

(19) UA

величини опору електричного ланцюга активного, ємного або індуктивного опору, тобто операція модуляції опору переміщенням. Із практичного досвіду відомо, що неможлива безконтактна модуляція активного електричного опору. Безконтактна модуляція ємного опору можлива, але лінійна модуляція ємного опору здійснюється при надто малих переміщеннях. При збільшенні величини переміщення на величину ємного опору починає інтенсивно впливати зовнішнє середовище. Ці недоліки відсутні при магнітній модуляції. Тому як прототип вибраний спосіб модуляції магнітного потоку, який є найближчим до запропонованого. Цей спосіб вимірювання використаний в пристрої по Заявці N 3929681 ФРН МКІ55 0 G 01 B7/02. Пристрій для вимірювання лінійного переміщення або кутового повороту. Опубл. 14.03.1991 р.

Спосіб-прототип характеризується такою послідовністю операцій

нерухомо з'єднують з двома об'єктами, які переміщуються відносно один одного, дві частини замкнутого магнітопровода,

одна частина замкнутого магнітопровода, зв'язана з рухомим об'єктом, переміщується відносно іншої,

модулюється величина магнітного опору магнітопровода переміщенням,

в просторі створюють магнітний потік, діючи на провідник джерелом ер с гармонічної форми,

перетворюють модуляцію магнітного потоку переміщенням в амплітудно-модульований сигнал напруги,

детектують сигнал, виконують дискретизацію і квантування амплітудно-модульованого сигналу,

по кількості квантів судять про величину переміщення

Спосіб-прототип характеризується невисокими чутливістю і точністю вимірювання, які обмежені високим рівнем шумів напруги шумів амплітудного детектування і квантування гармонічного сигналу напруги. Високий рівень шумів аналогового перетворення є основною причиною, яка не дає можливості підвищити чутливість і точність вимірювання і досягти вирішення поставленої задачі.

Цифрову чутливість вимірювання переміщення ΔX оцінюють такою мінімальною величиною переміщення, яке викликає появу одного кванта при цифровому перетворенні

$$\Delta X = \frac{\Delta U_m}{S_{UX}} \quad (1)$$

де ΔU_m - величина кванта модульованого сигналу, S_{UX} - крутизна перетворення переміщення x в амплітуду магнітним модулятором

$$S_{UX} = \frac{dU_m}{dx} \quad (2)$$

Суттєвою ознакою способу-прототипу є використання операції детектування для одержання аналогового сигналу переміщення U_m , який дискретизують і квантують. Амплітудне детектування перетворює гармонічний сигнал, в якому інформаційним параметром є амплітуда, в аналоговий сигнал по відношенню до переміщення, тобто сигнал, який в часі змінюється аналогічно переміщенню

Величину ΔU_m в формулі (1) знаходять із рівняння

$$\Delta U_m = U_{шд} = \Delta U_{АЦП} \quad (3)$$

де $U_{шд}$ - середнє квадратичне значення шуму на виході детектора, $\Delta U_{АЦП}$ - шаг квантування аналого-цифрового перетворювача. Величина напруги шуму на вході аналого-цифрового перетворювача буде дорівнювати величині вихідного шуму детектора, тому що вихідний опір магнітного перетворювача значно менший за вихідний опір детектора

$$U_{шд} = \sqrt{kTR_d \Delta f_d} \quad (4)$$

де k - постійна Больцмана, T - абсолютна температура, R_d , Δf_d - відповідно, вихідний опір і поло-са частот детектора

Чутливість способу-прототипу знайдемо при $\Delta U_m = U_{шд}$ з врахуванням (2),

підставляючи типові значення $S_{UX}=100\text{В/м}$, $U_m = 10^{-4}\text{В}$ в формулу (1). При цьому $\Delta X = 10^{-6}\text{ м/кВ}$, що відповідає кращим технічним реалізаціям способу-прототипу

Із формул (1) і (3) безпосередньо витикає, що ефективний метод підвищення цифрової чутливості вимірювання інформаційних параметрів сигналів шляхом їх квантування є зменшення інтенсивності шуму в складі аналогового сигналу, одержаного після детектування, якщо шумом вимірюваного перетворювача можна знехтувати. Про це свідчить існуючий спосіб підвищення чутливості вимірювання методом охолодження детектора, що веде до зменшення шумової температури у відповідності до формули (4). Найбільш ефективний шлях збільшення чутливості полягає в виконанні цифрового вимірювального перетворення модуляції магнітного опору переміщенням, яке не потребує амплітудного детектування і амплітудного квантування, а засноване на часовому розгортуючому перетворенні магнітного опору і квантуванні інтервалу часу, причому такому розгортуючому перетворенні, яке не було б пов'язане з наявністю високоомних шумових процесів

В основу винаходу поставлено задачу створення такого способу вимірювання малих переміщень з довільною швидкістю руху, який би характеризувався високою цифровою чутливістю, і на підставі цього досягти високої точності вимірювання переміщень

Поставлена задача вирішується на підставі застосування методів перетворень, які характеризуються низькими шумовими параметрами перетворення модуляції магнітного опору магнітопровода переміщенням в різницю фаз між гармонічним сигналом ер с збудження електромагнітної резонансної системи магнетик-провідник і струмом в провіднику, перетворення руху в часовий інтервал і квантування часового інтервалу, тобто застосування розгортуючого цифрового перетворення

Рішення поставленої задачі досягається завдяки тому, що запропонований спосіб вимірювання характеризується такою послідовністю операцій

нерухомо з'єднують з двома об'єктами, які переміщуються відносно один одного, дві частини замкнутого магнітопровода,

переміщують одну частину замкнутого магнітопровода, зв'язаного з рухомим об'єктом, віднос-

но іншої,

модулюють величину магнітного опору магнітопровода,

створюють в просторі магнітний потік, діючи на провідник джерелом е р с гармонічної форми,

замикають магнітопроводом магнітні силові лінії, створені струмом гармонічної форми, по всій довжині провідника,

встановлюють частоту зовнішнього джерела гармонічної е р с рівною частоті енергетичного резонансу в електромагнітній системі магнітопровод-провідник,

перетворюють модуляцію магнітного потоку в фазовий зсув струму в провіднику відносно фази е р с,

перетворюють фазовий зсув гармонічного сигналу в інтервал часу як інформаційний параметр,

квантують інтервал часу,

по кількості квантів оцінюють величину переміщення

Відмінними ознаками пропонованого способу вимірювання малих переміщень є замикання магнітних силових ліній, створених струмом гармонічної форми, по всій довжині провідника, тобто мінімізація магнітного опору магнітного потоку, встановлення частоти зовнішнього джерела гармонічної е р с рівною частоті енергетичного резонансу в електромагнітній системі магнітопровод-провідник, перетворення модуляції магнітного потоку в фазовий зсув струму в провіднику відносно фази е р с, перетворення фазового зсуву гармонічного сигналу в інтервал часу і квантування інтервалу часу

Комплекс дій, якими відрізняється пропонований спосіб від прототипу, дозволяє вирішити технічну задачу - підвищити чутливість і точність вимірювання малих переміщень з довільною швидкістю руху

Нові властивості пропонованого способу, які використовуються для вимірювання малих переміщень, полягають в застосуванні фазового вимірювального перетворення, яке виключає застосування амплітудного перетворення, і наявність операції розгортуючого перетворення, які характеризуються низьким рівнем шуму

Для всіх гармонічних процесів справедливе співвідношення між різницею фаз $\Delta\varphi$ двох сигналів однакової кутової частоти $\omega = 2\pi/T$, T - період, і часовим інтервалом Δt , який відповідає часу затримки одного сигналу по відношенню до іншого

$$\Delta\varphi = \omega \Delta t \quad (5)$$

Якщо існує фізичний процес перетворення переміщення Δx в різницю фаз $\Delta\varphi$, то його характеризують крутизною перетворення відповідних фізичних величин

$$S_{\varphi x} = \frac{\Delta\varphi}{\Delta x} \quad (6)$$

Враховуючи (5), одержуємо цифрову чутливість вимірювання переміщення способом розгортуючого перетворення

$$\Delta X = \frac{\omega \Delta t}{S_{\varphi x}} \bigg|_{\Delta t = 1 \text{ кс}} \quad (7)$$

Тобто, чутливість вимірювання переміщення тим вища, чим на більш низькій частоті ω викону-

ється фазове перетворення переміщення, чим більша крутизна фазового перетворення переміщення $S_{\varphi x}$ і чим менший шаг квантування часового інтервалу Δt , величина якого дорівнює одному кванту часу

Найбільшою чутливістю характеризується електромагнітний процес перетворення опору в різницю фаз в електромагнітній системі магнетик-провідник в режимі енергетичного резонансу системи. Теоретично і практично доведено, що така електромагнітна система здійснює перетворення модуляції магнітного опору в різницю фаз між е р с збудження і струмом в замкнутому провіднику

Якщо для розгортуючого перетворення магнітного опору використовувати процеси електромагнітної індукції в електромагнітній резонансній системі то в формулі (7) потрібно частоту ω прирівняти частоті енергетичного резонансу

$$\omega_0 = \sqrt{R_M \cdot R_E} \quad (8)$$

де R_M - магнітний опір для потоку вихрового магнітного поля в магнітопроводі, R_E - електричний опір для потоку вихрового електричного поля в замкнутому провіднику. Для збільшення цифрової чутливості вимірювання переміщення відповідно до формули (8) потрібно зменшувати R_M і R_E . На спосіб зменшення цих параметрів електромагнітної резонансної системи вказують перше і друге рівняння Максвелла. Взаємні перетворення потоків електричного і магнітного полів симетричні. Магнітне вихрове поле у відповідності з першим рівнянням Максвелла охоплює замкненими силовими лініями потік електричного поля, а вихрове електричне поле у відповідності з другим рівнянням охоплює силовими лініями потік магнітного поля. Отже, щоб максимально збільшити зв'язок при взаємному перетворенні полів треба магнітні силові лінії замкнути магнітопроводом по найкоротшому шляху і по всій довжині замкнутого провідника, а електричні силові лінії замкнути провідником по найкоротшому шляху і по всій довжині замкнутого магнітопровода. Таку конструкцію називають електромагнітною системою магнетик-провідник. Розгортуюче вимірювальне перетворення, наслідком якого є перетворення переміщення в цифровий потік дискретних сигналів з фазовою модуляцією, яку перетворюють в часову, виконується електромагнітною системою, яка характеризується малим в порівнянні з прототипом шумовим опором. Тому впливом внутрішнього шуму розгортуючого електромагнітного перетворювача нехтують в порівнянні з шумом формування часового інтервалу із фазозсунутих сигналів

Запропонований спосіб вимірювання малих переміщень з довільною швидкістю реалізується за допомогою такої послідовності дій фізичних процесів

Нерухомо з'єднують з двома об'єктами, які переміщуються відносно один одного, дві частини замкнутого магнітопровода. Таким чином при вимірюванні переміщується одна частина замкнутого магнітопровода відносно другої, в результаті чого модулюється магнітний опір магнітопровода

В магнітопроводі створюють гармонічний магнітний потік, збуджуючи провідник, охоплюючий

магнітопровід, струмом від джерела ер с гармонічної форми

Замикають магнітопроводом магнітні силові лінії, створені струмом, по всій довжині провідника, створюючи мінімальний опір магнітного потоку в магнітопроводі

Встановлюють частоту зовнішнього джерела гармонічної ер с рівною частоті енергетичного резонансу в електромагнітній системі магнетик-провідник, функції якої виконує магнітопровід з модульованим переміщенням магнітним опором і охоплюючий його провідник

Переміщенням відносно один одного двох частин магнітопроводу модулюють магнітний потік і перетворюють його в модуляцію фазового зсуву струму в провіднику, охоплюючому магнітопровід, відносно фази збуджуючої гармонічної ер с

Будемо вважати, що переміщення X викликає зміну індуктивності в електромагнітній системі. Виразимо залежність індуктивності від переміщення функцією

$$L(x) = L_0(1 - \alpha x) \quad (9)$$

де L_0 - початкове значення індуктивності, α - коефіцієнт модуляції, що має розмірність 1/м

Коли допустити однопроцентну модуляцію індуктивності переміщенням величиною $X_{\max} = 0,5 \cdot 10^{-4}$ м, то одержимо значення $\alpha = 20$ 1/м

Знайдемо значення крутизни перетворення переміщення в різницю фаз, враховуючи (9)

$$S_{\varphi x} = \frac{d\varphi_s}{dL(x)} \cdot \frac{dL(x)}{dx} \quad (10)$$

$$\text{де } \frac{dL(x)}{dx} = \alpha L_0 \text{ відповідно (9), а відповідно (5)}$$

$$\varphi_s|_{\omega=\omega_0} = \frac{2\omega_0^3 [L(x)]^2}{R^2} \quad (11)$$

де R - активний опір провідника в електромагнітній системі. Після диференціювання

(11) знаходимо при $L(x) = L_0$

$$S_{\varphi x} = \frac{4\omega_0^3 L_0^2}{R^2} \quad (12)$$

Цифрову чутливість вимірювання переміщення визначають, підставляючи (12) в (7)

$$\Delta X = \frac{R^2 \Delta t}{1\alpha\omega_0^2 L_0^2} \quad (13)$$

Для електромагнітної системи магнетик-провідник частота фазового резонансу складала 50 Гц, $R = 1,6 \cdot 10^3$ Ом, $L_0 = 400$ Гн, шаг квантування числового інтервалу $\Delta t = 10^{-8}$ с. Відповідно до формули (13) $\Delta x = 2 \cdot 10^{-11}$ м

Така чутливість вимірювання малих переміщень з довільною швидкістю руху відповідає цифровій чутливості по переміщенню мембрани конденсаторних мікрофонів

Розрахунково і експериментально встановлено, що чутливість запропонованого способу більш як на чотири десятичних порядки перевищує чутливість відомих способів вимірювання переміщень з модуляцією індуктивності

Пропонований спосіб вимірювання переміщень може використовуватись в пристроях вимірювання параметрів руху, тиску, маси, побудови акселерометрів, прецизійних вагів та ін