



УКРАЇНА

(19) UA

(11) 78133

(13) C2

(51) МПК (2006)

G01R 25/00

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

(54) СПОСІБ ВИЗНАЧЕННЯ ВІДНОСНОГО ФАЗОВОГО ЗСУВУ ДВОХ ГАРМОНІЧНИХ СИГНАЛІВ

1

2

(21) а200505619

(22) 10.06.2005

(24) 15.02.2007

(46) 15.02.2007, Бюл. № 2, 2007 р.

(72) Дупак Максим Михайлович, Кострицький Валерій Всеволодович

(73) КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ТЕХНОЛОГІЙ ТА ДИЗАЙНУ

(56) RU 2929964 C1, 27.02.1995

RU 2037831, 19.06.1995

SU 1499265 A1, 07.08.1989

(57) 1. Спосіб визначення відносного фазового зсуву двох гармонічних сигналів, який полягає у тому, що здійснюють взаємодію сигналів, що досліджуються, а про співвідношення фаз судять за якісною оцінкою результатів їх взаємодії, який **відрізняється** тим, що попередньо вибирають точку відліку T_0 , встановлену за гармонічним сигналом U_1 з фазою T_1 , від точки T_0 до моменту, коли сигнал U_2 набуває фази $\pi + T_0$ сигналу U_1 , підраховують фазу T_2 за гармонічним сигналом U_2 , причому на проміжку $|\varphi| < \pi/2$ обчислюють тангенс

відносного фазового зсуву φ синхронних гармонічних сигналів U_1 та U_2 за формулою:

$$\operatorname{tg} T_2 = \operatorname{tg} \varphi,$$

а на проміжку $|\varphi| > \pi/2$ обчислюють тангенс відносного фазового зсуву синхронних гармонічних сигналів U_1 та U_2 за формулою:

$$|\operatorname{tg} T_2| = |\operatorname{tg} \varphi|,$$

а величину відносного фазового зсуву φ між синхронними гармонічними сигналами U_1 та U_2 на проміжку $|\varphi| < \pi/2$ обчислюють за формулою:

$$\varphi = \arctg(\operatorname{tg} T_2).$$

2. Спосіб за п. 1, який **відрізняється** тим, що фазу T_2 обчислюють із співвідношення:

$$T_2 = \frac{\pi}{t_\pi} t_2,$$

де t_2 - проміжок часу від встановленої за гармонічним сигналом U_1 точки відліку T_0 до моменту, коли гармонічний сигнал U_2 набуває фази $\pi + T_0$ сигналу U_1 ;

t_π - час за фазовий проміжок π для сигналу U_2 .

Винахід відноситься до способу визначення відносного фазового зсуву двох гармонічних сигналів і може бути використаний у вимірювальній техніці при визначенні з високою точністю різниці фаз двох гармонічних сигналів у широкому динамічному діапазоні. Наприклад, винахід може бути застосований у дефектоскопії матеріалів, а саме у методах неруйнівного контролю.

Відомий спосіб визначення відносного фазового зсуву двох гармонічних сигналів [Кофлін Р. Дріскоп Ф. Операційні підсилювачі та інтегральні мікросхеми, М: Мир, 1979, с.207], за яким з добутку двох сигналів, які аналізують, виділяють постійну складову та вимірюють величину її напруги, що пропорційна абсолютному значенню відносного фазового зсуву. Спосіб характеризується низькою точністю вимірювань при виділенні постійної складової, отриманої від добутку сигналів, особливо на низьких частотах.

Відомий спосіб визначення відносного фазового зсуву двох гармонічних сигналів [Авторське свідоцтво РФ №2039361, G01R 25/00, 1995], аргументований на вимірі миттєвих значень відфільтрованих від постійної складової сигналів $X(t)$ та $Y(t)$, що мають період коливань T . Вимірюють два миттєвих значення одного з сигналів, прийнятого за вимірювальний, в момент часу $t_1 T/8$ та $T_2 = 3T/8$ з інтервалу напівхвилі другого сигналу, прийнятого за опорний, значення різниці фаз визначають за формулою

$$F_0 = m(g + \pi \cdot n)$$

$$\text{де } g = \arctg\{(X(t_1) - X(t_2)) / (X(t_1) + X(t_2))\},$$

коли $X(t)$ опереждає за фазою $Y(t)$, та

$$g = -\arctg\{(X(t_1) - X(t_2)) / (X(t_1) + X(t_2))\},$$

коли $X(t)$ відстає за фазою від $Y(t)$.

$n=0$, $m=1$ для синфазних сигналів, $|F_0| \leq \pi/2$;

(13) C2

(11) 78133

(19) UA

$m=-1$, $n=-1$ при $g>0$ або $n=1$ при $g<0$ - для профазних сигналів $\pi/2 < |F_0| \leq \pi$.

Спосіб складний з точки зору технічної реалізації, а також призводить до значних похибок через складні математичні розрахунки.

Відомий також спосіб визначення відносного фазового зсуву двох гармонічних сигналів [Патент РФ №2029964, G01R 25/00, 1995], який полягає у тому, що здійснюють взаємодію сигналів, що досліджуються, а про співвідношення фаз судять за якісною оцінкою результатів їх взаємодії.

Відомий спосіб передбачає реєстрацію амплітуд гармонічних сигналів і їх співвідношення, що дають певну похибку результату, а це призводить до зниження точності вимірювань.

В основу винаходу поставлена задача створити такий спосіб визначення відносного фазового зсуву двох гармонічних коливань, який шляхом введення окремих операцій та умов їх виконання призводить до спрощення технічної реалізації способу та підвищення точності вимірювань.

Поставлена задача вирішена тим, що в способі визначення відносного фазового зсуву двох гармонічних сигналів, який полягає у тому, що здійснюють взаємодію сигналів, що досліджуються, а про співвідношення фаз судять за якісною оцінкою результатів їх взаємодії, згідно з винаходом, попередньо обирають точку відліку T_0 , встановлену за гармонічним сигналом U_1 з фазою T_1 , від точки T_0 до моменту, коли сигнал U_1 набуває фази $\pi+T_0$ сигналу U_1 , підраховують фазу T_2 за гармонічним сигналом U_1 , причому

на проміжку $|\varphi| < \pi/2$, обчислюють тангенс відносного фазового зсуву φ синхронних гармонічних сигналів U_1 та U_2 за формулою:

$$\operatorname{tg} T_2 = \operatorname{tg} \varphi,$$

а на проміжку $|\varphi| > \pi/2$ обчислюють тангенс відносного фазового зсуву синхронних гармонічних сигналів U_1 та U_2 за формулою:

$$|\operatorname{tg} T_2| = |\operatorname{tg} \varphi|$$

Доцільно, щоб величину відносного фазового зсуву φ між синхронними гармонічними сигналами U_1 та U_2 на проміжку $|\varphi| < \pi/2$ обчислювали за формулою:

$$\varphi = \arctg(\operatorname{tg} T_2)$$

Доцільно, щоб фазу T_2 обчислювали із співвідношення:

$$T_2 = \frac{\pi}{t_\pi} t_2$$

де t_2 - проміжок часу від встановленої за гармонічним сигналом U_1 точки відліку T_0 , до моменту, коли гармонічний сигнал U_1 набуває фази $\pi+T_0$ сигналу U_1 ;

t_π - час за фазовий проміжок π для сигналу U_2 .

Аналіз синхронних гармонічних коливань, зсунутих за фазою, виконують за часом їх розповсюдження, що дозволяє здійснювати аналіз легше і точніше, ніж за певними амплітудними значеннями сигналу.

Гармонічний сигнал можна представити у комплексному вигляді:

$$U_1 = A e^{j\omega t},$$

де A - амплітуда коливань,

t - час,

ω - циклічна частота. $\omega = 2\pi f$,

де f - частота гармонічних коливань.

Враховуючи фазовий зсув між гармонічними сигналами, розглянемо випадок коли сигнал U_2 розповсюджується відносно сигналу U_1 з опереженням по фазі. Запишемо другий сигнал у комплексному вигляді

$$U_2 = B e^{j(\omega t + \varphi)},$$

де B - амплітуда коливань,

φ - фазовий зсув другого сигналу U_2 відносно сигналу U_1 .

Введемо позначення фази коливань гармонічного сигналу U_1 , $T_1 = \omega t$, фаза сигналу U_2 ,

$$T_2 = T_1 + \varphi \quad (1)$$

Якщо виконується умова (1), використовуючи формулу Ейлера, запишемо:

$$\cos T_2 + j \sin T_2 = \cos(T_1 + \varphi) + j \sin(T_1 + \varphi) \quad (2)$$

використовуючи тригонометричні перетворення отримуємо:

$$\cos T_2 + j \sin T_2 = \cos T_1 \cos \varphi - \sin T_1 \sin \varphi + j(\sin T_1 \cos \varphi + \cos T_1 \sin \varphi) \quad (3)$$

Розглянемо окремий випадок, коли $T_1 = \pi$, перепишемо вираз (3) у вигляді:

$$\cos T_2 + j \sin T_2 = -\cos \varphi - j \sin \varphi \quad (4)$$

відійдемо від тригонометричної форми запису комплексних чисел (4), запишемо аргумент комплексної змінної:

$$\operatorname{tg} T_2 = \operatorname{tg} \varphi \quad (5)$$

$$\arctg(\operatorname{tg} T_2) + \pi n = \varphi \quad (6)$$

при $\varphi \neq \pi/2(2n+1)$, $T_2 \neq \pi/2; n, k \in \mathbb{Z}$

Розглядаючи випадок коли сигнал U_2 розповсюджується відносно сигналу U_1 з відставанням за фазою, вираз (1) запишемо у вигляді:

$$T_2 = T_1 - \varphi \quad (7)$$

Використовуючи формулу Ейлера та відповідні тригонометричні перетворення, для окремого випадку, коли $T_1 = \pi$, отримуємо:

$$\cos T_2 + j \sin T_2 = -\cos \varphi + j \sin \varphi \quad (8)$$

звідки

$$-\operatorname{tg} T_2 = \operatorname{tg} \varphi \quad (9)$$

$$-\arctg(\operatorname{tg} T_2) + \pi n = \varphi \quad (10)$$

$$\text{при } \varphi \neq \pi/2(2n+1), T_2 \neq \pi/2(2k+1); n, k \in \mathbb{Z} \quad (12)$$

Фазу T_2 коливань гармонічного сигналу U_2 , пов'язують з часом t_2 та частотою ω_2 , співвідношенням: $T_2 = \omega_2 t_2$. У тому випадку, коли фаза $T_2 = \pi$, частота буде дорівнювати $\omega_2 = \pi/t_\pi$,

де t_π - час за фазовий проміжок π для сигналу

$$U_2. \text{ Тоді фаза } T_2 = \frac{\pi}{t_\pi t_2}.$$

Спосіб, що заявляється, особливо зручний у використанні при визначенні фазових кутів для коливань низької частоти, та кутів фазового зсуву у діапазоні $(-\pi/2; \pi/2)$ для гармонічних коливань. У діапазоні кутів фазового зсуву $(-\pi/2; \pi/2)$ з урахуванням умови (12), при $n=0$, можна записати вирази (6) та (10) у вигляді відповідно

$$\arctg(\operatorname{tg} T_2) = \varphi \quad (13)$$

коли сигнал U2 розповсюджується відносно сигналу U1 з упередженням по фазі, та

$$-\arctg(\operatorname{tg} T_2) = \varphi \quad (14)$$

коли сигнал U2 розповсюджується відносно сигналу U1 з відставанням за фазою. Отже, з виразів (13) та (14) бачимо, що фазовий зсув $|\varphi|$ є абсолютним значенням кута відносного фазового зсуву двох гармонічних коливань. Знак фазового зсуву φ , якщо $\varphi < 0$ на проміжку $\varphi \in (-\pi/2; \pi/2)$, вказує на відставання сигналу U2 відносно сигналу U1 за фазою. Якщо $\varphi > 0$, сигнал U2 опереждає сигнал U1 з фазовим зсувом $|\varphi|$.

На Фіг.1 графічно представлено розповсюдження гармонічних коливань у випадку, коли сигнал U2, відстає від сигналу U1, на Фіг.2 – графічно представлено розповсюдження гармонічних коливань у випадку, коли сигнал U1 відстає від сигналу U2.

За способом, що заявляється (Фіг.1, Фіг.2), визначення відносного фазового зсуву двох гармонічних сигналів відбувається таким чином. Реєструють фазу $T_2 = \omega_2 t_2$,

де t_2 – час,

ω_2 – циклічна частота гармонічного сигналу U2, зсунутого за фазою відносно опорного гармонічного сигналу U1.

Сигнал U2 розповсюджується синхронно з сигналом U1. Попередньо обирають точку відліку T_0 , встановлюючи її за гармонічним сигналом U1 (зручно, якщо точку відліку T_0 обирають у момент, коли фаза гармонічного сигналу U1 набуває значення $T_1 = n\pi$, де $n \in \mathbb{Z}$), від точки T_0 до моменту, коли сигнал U2 набуває фази $\pi + T_0$ сигналу U1, підраховують значення фази T_1 за гармонічним сигналом U2. На проміжку $|\varphi| < \pi/2$, обчислюють тангенс відносного фазового зсуву φ синхронних гармонічних сигналів U1 та U2 за формулою:

$$\operatorname{tg} T_2 = \operatorname{tg} \varphi,$$

на проміжку $|\varphi| > \pi/2$ обчислюють тангенс відносного фазового зсуву синхронних гармонічних сигналів U1 та U2 за формулою:

$$|\operatorname{tg} T_2| = |\operatorname{tg} \varphi|.$$

Величину відносного фазового зсуву φ між синхронними гармонічними сигналами U1 та U2 на проміжку $|\varphi| < \pi/2$ обчислюють за формулою:

$$\varphi = \arctg(\operatorname{tg} T_2).$$

Отримане значення відносного фазового зсуву φ буде від'ємне, коли гармонічний сигнал U2 відстає за фазою від гармонічного сигналу U1, і буде позитивне, коли гармонічний сигнал U2 опереждає за фазою гармонічний сигнал U1.

А на проміжку $|\varphi| > \pi/2$ тангенс кута відносного фазового зсуву φ визначають як:

$$|\operatorname{tg} T_2| = |\operatorname{tg} \varphi|.$$

Для спрощення технічної реалізації методу фазу коливань гармонічних сигналів пов'язують з часом розповсюдження коливань. Тобто фазу T_2 обчислюють із співвідношення:

$$T_2 = \frac{\pi}{t_{\pi} t_2},$$

де t_2 – проміжок часу від встановленої за гармонічним сигналом U1 точки відліку T_0 , до моменту, коли гармонічний сигнал U2 набуває фази $\pi + T_0$ сигналу U1,

t_{π} – час за фазовий проміжок π для сигналу U2.

Таким чином, спосіб визначення відносного фазового зсуву двох гармонічних сигналів, що заявляється, з великою точністю дає визначення величини тангенса відносного фазового зсуву у діапазоні $0-360^\circ$. В діапазоні відносного фазового зсуву $|\varphi| < \pi/2$, спосіб дає змогу встановити знак різниці фаз гармонічних сигналів що досліджують, та визначити з великою точністю величину відносного фазового зсуву φ .

Приклад 1.

Моделюємо дослідження по визначенню відносного фазового зсуву двох гармонічних коливань з допомогою ПЕОМ, задаючи окремі параметри коливань, а також і величину відносного фазового зсуву, можна спостерігати графічні залежності обох гармонічних сигналів ($U = f(t)$) залежність тангенсу кута відносного зсуву від частоти та амплітуди сигналів, отримати значення кута відносного зсуву фаз коливань та інформацію про відносне опередження/відставання сигналу при $|\varphi| < \pi/2$, та значення тангенсу кута відносного зсуву фаз двох гармонічних коливань при $\varphi \neq \pi/2(2n+1)$.

Приклад 2.

Електричний гармонічний сигнал заданої частоти формують генератором гармонічних коливань, за допомогою перетворювача у матеріалі викликають резонансні коливання заданої амплітуди, які реєструються приймаючим перетворювачем у вигляді гармонічного сигналу, який підсилюють, виділяють основну моду. Гармонічні сигнали на вході та виході з матеріалу матимуть однаковий характер розповсюдження – гармонічні коливання, однакову частоту, але різні амплітуди коливань, також коливання матимуть відносний зсув. За допомогою компараторів, налаштованих на напругу нульового рівня, гармонічні коливання перетворюють в електричні імпульси. За допомогою цих імпульсів керують електронним частотоміром, що знаходиться у режимі підрахунку каліброваних імпульсів, та генератором каліброваних імпульсів. Запустивши генератор каліброваних імпульсів (імпульсів заданої тривалості та скважності), підраховують кількість Q імпульсів частотоміром з моменту часу, коли гармонічний сигнал генератору гармонічних коливань перетинає вісь нульового рівня напруги та стає від'ємним (див. Фіг.1, Фіг.2), до моменту часу коли основна мода підсиленого гармонічного сигналу, зареєстрованого на виході матеріалу, змінює своє значення напруги з від'ємної на додатну. Час можна виразити через кількість імпульсів Q , тривалість імпульсів h та скважність s :

$t_2 = (h+s) \cdot Q$, h та s – постійні в межах приладу. Фазу коливань визначають за формулою

$$T_2 = \omega_2 t_2.$$

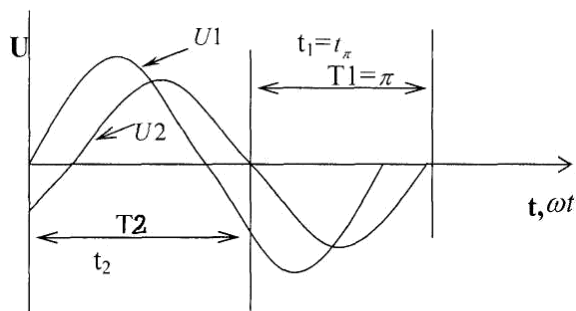
Якщо частоти гармонічних коливань однакові, циклічна частота ω_2 дорівнює відомій циклічній частоті ω_1 . Якщо частоти гармонічних коливань

різні, $\omega_2 = \frac{\pi}{t_\pi}$, де t_π - час за π коливань сигналу

U2. Час t_π підраховують паралельно, з допомогою іншого частотоміру та генератору каліброваних імпульсів. Під час, коли основна мода підсиленого гармонічного сигналу, зареєстрованого на виході матеріалу, змінює своє значення напруги з від'ємної на додатну, починають підраховувати кількість каліброваних імпульсів W. Закінчують підраховувати кількість каліброваних імпульсів W, коли значення напруги основної моди підсиленого гармонічного сигналу, зареєстрованого на виході матеріалу, змінює своє значення напруги з додатної на від'ємне. $t_\pi = (h_1 + s_1) * W$, h_1 та s_1 - постійні в межах приладу. Час t_π відповідає фазі π основної моди підсиленого гармонічного сигналу, зареєстрованого на виході матеріалу.

Фазу коливань T_2 вираховують із співвідношення $T_2 = \frac{\pi}{t_\pi t_2} t_2$, див. Фіг.1, Фіг.2.

Якщо відносний фазовий зсув гармонічний коливань на вході та виході матеріалу $|\varphi| < \pi/2$, тоді $\arctg(\tg T_2) = \varphi$ при умові, що сигнал U2 опереждає по фазі сигнал U1, та $-\arctg(\tg T_2) = \varphi$, якщо сигнал U2 розповсюджується відносно сигналу U1 з відставанням за фазою. Знак фазового зсуву φ , якщо $\varphi < 0$, на проміжку $\varphi \in (-\pi/2; \pi/2)$, вказує на відставання сигналу U2 відносно сигналу U1 за фазою. Якщо $\varphi > 0$, сигнал U2 опереждає сигнал



Фіг. 1

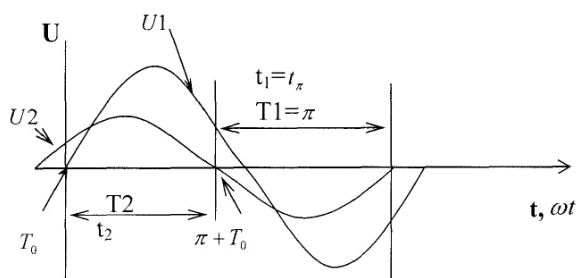
U1 з фазовим зсувом $|\varphi|$.

Якщо $|\varphi| > \pi/2$, тангенс кута відносного фазового зсуву визначають як

$$|\tg T_2| = |\tg \varphi|.$$

Винахід може знайти використання у дефектоскопії матеріалів. Так велосиметричний метод акустичного контролю фізико-механічних властивостей матеріалів базують на змінах шляху та швидкості розповсюдження хвиль під впливом дефекту матеріалу. В об'єкті контролю (ОК) збуджують безперервні, або імпульсні низькочастотні ультразвукові коливання (20-70 кГц). Дефекти реєструють чи за зміною зсуву фази прийнятого сигналу, чи за зміною часу розповсюдження хвилі між випромінювачем та приймачем дефектоскопу. Велосиметричний метод використовують для виявлення дефектів (розшарувань та непроклею) в неметалевих покриттях, та пластинах з декількох слоїв, а також контролю з'єднань в ОК металевих слоїв з неметалевим. [Неразрушающий контроль. В 5 кн. Кн.2. Акустические методы контроля: практическое пособие / И.Н. Ермолов и др. Под ред. В.В. Сухорукова - М.: Высшая школа, 1991 - 283с.].

Отже, спосіб, що заявляється, зручний у випадку технічного втілення, так як потребує визначення єдиного параметру - час, не потребує складних математичних обчислень та безліч перетворень електричного сигналу задля технічного втілення, що призводить до підвищення точності вимірювань. Він є абсолютно не критичним до коефіцієнту відношення амплітуд гармонічних сигналів, відносний фазовий зсув яких вимірюють. Спосіб може бути застосованим для визначення відносного фазового зсуву між гармонічними сигналами різних частот.



Фіг. 2