



УКРАЇНА

(19) UA (11) 56638 (13) U
(51) МПК (2011.01)
G01B 7/06 (2011.01)
G01N 27/00

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ
І НАУКИ УКРАЇНИ

ДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ

ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

видається під
відповідальність
власника
патенту

(54) ПРИСТРІЙ ДЛЯ ВИХОРОСТРУМОВОГО КОНТРОЛЮ

1

2

(21) u201007088

(22) 08.06.2010

(24) 25.01.2011

(46) 25.01.2011, Бюл.№ 2, 2011 р.

(72) БУЧМА ІГОР МИХАЙЛОВИЧ, РЕПЕТИЛО ТА-
РАС МИХАЙЛОВИЧ, ШАПОВАЛОВ ГЕОРГІЙ ОЛЕ-
КСАНДРОВИЧ

(73) НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ "ЛЬВІВСЬКА
ПОЛІТЕХНІКА"

(57) Пристрій для вихорострумowego контролю, що містить послідовно з'єднані генератор прямокутних імпульсів зі шпаруватістю два, подільник частоти та перший смуговий фільтр, послідовно з'єднані підсилювач потужності, вихорострумовой перетворювач, що містить послідовно з'єднані першу та другу обмотки, модулятор, який складається з першого та другого комутаторів, кожен з яких виконаний з двома сигнальними входами, одним керуючим входом і одним виходом, та першого диференційного підсилювача, причому перший сигнальний вхід першого комутатора під'єднаний до точки з'єднання підсилювача потужності і першої обмотки вихорострумowego перетворювача та є першим входом модулятора, другий сигнальний вхід першого комутатора і перший сигнальний вхід другого комутатора під'єднані до точки з'єднання першої і другої обмоток вихорострумowego перетворювача і є другим входом модулятора, другий сигнальний вхід другого комутатора під'єднаний до точки з'єднання підсилювача потужності і другої обмотки вихорострумowego перетворювача і є третім входом модулятора, керуючі входи комутаторів з'єднані між собою і є керуючим входом модулятора, вихід першого комутатора з'єднаний з першим входом першого диференційного підсилювача, вихід другого комутатора з'єднаний з другим входом першого диференційного підсилювача, а вихід першого диференційного підсилювача є виходом модулятора, другий смуговий фільтр, перший синхронний детектор, підсилювач змінного струму та другий синхронний детектор, другий та третій диференційні підсилювачі, послідовно з'єднані перший суматор, диференціатор, перший перемикач

та компаратор, причому керуючий вхід модулятора та керуючий вхід першого синхронного детектора з'єднані з виходом генератора прямокутних імпульсів, перший вхід другого диференційного підсилювача з'єднаний з першим входом модулятора, другий вхід другого диференційного підсилювача та перший вхід третього диференційного підсилювача з'єднані з другим входом модулятора, другий вхід третього диференційного підсилювача з'єднаний з третім входом модулятора, перший вхід першого суматора з'єднаний з виходом другого диференційного підсилювача, другий вхід першого суматора з'єднаний з виходом третього диференційного підсилювача, другий вхід першого перемикача з'єднаний з входом диференціатора, керуючий вхід другого синхронного детектора з'єднаний з виходом компаратора, який відрізняється тим, що додатково містить послідовно з'єднані третій смуговий фільтр і другий суматор, послідовно зустрічно з'єднані третю і четверту обмотки, що введені у вихорострумовой перетворювач, послідовно з'єднані подільник напруги, другий перемикач, четвертий смуговий фільтр і третій синхронний детектор, послідовно з'єднані третій суматор, мікроконтролер з вбудованим аналого-цифровим перетворювачем та зовнішній запам'ятовувальний пристрій, індикатор, причому подільник частоти має другий вихід, до якого під'єднано керуючий вхід третього синхронного детектора та вхід третього смугового фільтра, другий вхід другого суматора з'єднаний з виходом першого смугового фільтра, вихід другого суматора з'єднаний з входом підсилювача потужності, перший вивід третьої обмотки вихорострумowego перетворювача під'єднаний до входу подільника напруги, другий вивід четвертої обмотки вихорострумowego перетворювача та другий вхід другого перемикача під'єднані до загальної шини, вихід третього синхронного детектора з'єднаний з першим входом третього суматора, вихід другого синхронного детектора з'єднаний з другим входом третього суматора, вихід третього суматора з'єднаний з входом індикатора.

(19) UA (11) 56638 (13) U

Корисна модель належить до комп'ютеризованих пристроїв вихорострумового контролю і призначена для вимірювання товщин листових конструкцій зі сталі при односторонньому доступі до них.

Найбільш близьким до пропонованого рішення є пристрій для вихорострумового контролю, що містить послідовно з'єднані генератор прямокутних імпульсів зі шпаруватістю два, подільник частоти та перший смуговий фільтр, послідовно з'єднані підсилювач потужності, вихорострумовий перетворювач, що містить послідовно з'єднані першу та другу обмотки, модулятор, який складається з першого та другого комутаторів, кожен з яких виконаний з двома сигнальними входами, одним керуючим входом і одним виходом, та першого диференційного підсилювача, причому перший сигнальний вхід першого комутатора під'єднаний до точки з'єднання підсилювача потужності і першої обмотки вихорострумового перетворювача та є першим входом модулятора, другий сигнальний вхід першого комутатора під'єднаний до точки з'єднання першої і другої обмоток вихорострумового перетворювача і є другим входом модулятора, другий сигнальний вхід другого комутатора під'єднаний до точки з'єднання підсилювача потужності і другої обмотки вихорострумового перетворювача і є третім входом модулятора, керуючі входи комутаторів з'єднані між собою і є керуючим входом модулятора, вихід першого комутатора з'єднаний з першим входом першого диференційного підсилювача, вихід другого комутатора з'єднаний з другим входом першого диференційного підсилювача, а вихід першого диференційного підсилювача є виходом модулятора, другий смуговий фільтр, перший синхронний детектор, підсилювач змінного струму та другий синхронний детектор, другий та третій диференційні підсилювачі, послідовно з'єднані перший суматор, диференціатор, перший перемикач та компаратор, причому керуючий вхід модулятора та керуючий вхід першого синхронного детектора з'єднані з виходом генератора прямокутних імпульсів, перший вхід другого диференційного підсилювача з'єднаний з першим входом модулятора, другий вхід другого диференційного підсилювача та перший вхід третього диференційного підсилювача з'єднані з другим входом модулятора, другий вхід третього диференційного підсилювача з'єднаний з третім входом модулятора, перший вхід першого суматора з'єднаний з виходом другого диференційного підсилювача, другий вхід першого суматора з'єднаний з виходом третього диференційного підсилювача, другий вхід першого перемикача з'єднаний з входом диференціатора, керуючий вхід другого синхронного детектора з'єднаний з виходом компаратора [Патент на корисну модель №49284. Україна. МПК(2009) G01N27/00. Пристрій для вихорострумового контролю/ Бучма І.М., Шаповалов Г.О., РепетилоТ.М.; заявник і власник патенту Національний ун-т "Львівська політехніка". -№и200911118 заявл. 02.11.2009; опубл. 26.04.2010, Бюл. № 8. - 11с.].

Однак у такому пристрої виникає похибка за рахунок щілини між вихорострумовим перетворювачем і поверхнею листової конструкції.

В основу корисної моделі поставлено завдання створити пристрій для вихорострумового контролю, в якому введення нових елементів та зв'язків між ними зменшило б вплив щілини, що підвищить точність вимірювання.

Поставлене завдання вирішується тим, що пристрій для вихорострумового контролю, що містить послідовно з'єднані генератор прямокутних імпульсів зі шпаруватістю два, подільник частоти та перший смуговий фільтр, послідовно з'єднані підсилювач потужності, вихорострумовий перетворювач, що містить послідовно з'єднані першу та другу обмотки, модулятор, який складається з першого та другого комутаторів, кожен з яких виконаний з двома сигнальними входами, одним керуючим входом і одним виходом, та першого диференційного підсилювача, причому перший сигнальний вхід першого комутатора під'єднаний до точки з'єднання підсилювача потужності і першої обмотки вихорострумового перетворювача та є першим входом модулятора, другий сигнальний вхід першого комутатора під'єднаний до точки з'єднання першої і другої обмоток вихорострумового перетворювача і є другим входом модулятора, другий сигнальний вхід другого комутатора під'єднаний до точки з'єднання підсилювача потужності і другої обмотки вихорострумового перетворювача і є третім входом модулятора, керуючі входи комутаторів з'єднані між собою і є керуючим входом модулятора, вихід першого комутатора з'єднаний з першим входом першого диференційного підсилювача, вихід другого комутатора з'єднаний з другим входом першого диференційного підсилювача, а вихід першого диференційного підсилювача є виходом модулятора, другий смуговий фільтр, перший синхронний детектор, підсилювач змінного струму та другий синхронний детектор, другий та третій диференційні підсилювачі, послідовно з'єднані перший суматор, диференціатор, перший перемикач та компаратор, причому керуючий вхід модулятора та керуючий вхід першого синхронного детектора з'єднані з виходом генератора прямокутних імпульсів, перший вхід другого диференційного підсилювача з'єднаний з першим входом модулятора, другий вхід другого диференційного підсилювача та перший вхід третього диференційного підсилювача з'єднані з другим входом модулятора, другий вхід третього диференційного підсилювача з'єднаний з третім входом модулятора, перший вхід першого суматора з'єднаний з виходом другого диференційного підсилювача, другий вхід першого суматора з'єднаний з виходом третього диференційного підсилювача, другий вхід першого перемикача з'єднаний з входом диференціатора, керуючий вхід другого синхронного детектора з'єднаний з виходом компаратора, згідно корисної моделі додатково містить послідовно з'єднані третій смуговий фільтр і другий суматор, послідовно зустрічно з'єднані третю і четверту обмотки, що введені у вихорострумовий перетворювач, послідовно з'єд-

нані подільник напруги, другий перемикач, четвертий смуговий фільтр і третій синхронний детектор, послідовно з'єднані третій суматор, мікроконтролер з вбудованим аналого-цифровим перетворювачем та зовнішній запам'ятовувальний пристрій, індикатор, причому подільник частоти має другий вихід, до якого під'єднано керуючий вхід третього синхронного детектора та вхід третього смугового фільтра, другий вхід другого суматора з'єднаний з виходом першого смугового фільтра, вихід другого суматора з'єднаний з входом підсилювача потужності, перший вивід третьої обмотки вихорострумового перетворювача під'єднаний до входу подільника напруги, другий вивід четвертої обмотки вихорострумового перетворювача та другий вхід другого перемикача під'єднані до загальної шини, вихід третього синхронного детектора з'єднаний з першим входом третього суматора, вихід другого синхронного детектора з'єднаний з другим входом третього суматора, вихід третього суматора з'єднаний з входом індикатора.

Введення третього смугового фільтра і другого суматора дозволяє виділити гармонічну складову високої частоти і додати її до низькочастотного гармонічного сигналу на вході підсилювача потужності та сформувані на виході підсилювача потужності сигнал, що складається з двох гармонік.

Введення подільника напруги дозволяє вирівнювати чутливості високочастотного та низькочастотного сигналів до змін щільності, а це необхідно для зменшення впливу щільності на точність вимірювання.

Введення другого перемикача дозволяє відмикати сигнал високої частоти для здійснення операцій калібрування пристрою на низькій частоті.

Введення третьої і четвертої обмоток вихорострумового перетворювача, четвертого смугового фільтра та третього синхронного детектора дозволяє виділити і перетворити складову високої частоти та отримати інформацію про щільність між вихорострумовим перетворювачем і поверхнею листової конструкції.

Введення третього суматора дозволяє здійснити компенсацію впливу щільності.

Введення мікроконтролера з вбудованим аналого-цифровим перетворювачем та зовнішнього запам'ятовувального пристрою дозволяє зберігати дані контролю в цифровій формі для подальшого їх оброблення.

Це дозволяє підвищити точність вимірювання товщини сталевих листових конструкцій шляхом зменшення похибки вимірювання, зумовленої змінами щільності.

На Фіг. зображено структурну схему пристрою.

Пристрій складається з послідовно з'єднаних генератора 1 прямокутних імпульсів зі шпаруватістю два, подільника частоти 2 та першого смугового фільтра 3, послідовно з'єднаних підсилювача потужності 4, вихорострумового перетворювача 5, що містить послідовно з'єднані першу 6 та другу 7 обмотки, модулятора 8, який складається з першого 9 та другого 10 комутаторів, кожен з яких виконаний з двома сигнальними входами, одним керуючим входом і одним виходом, та першого диференційного підсилювача 11, причому перший

сигнальний вхід першого комутатора 9 під'єднаний до точки з'єднання підсилювача потужності 4 і першої обмотки 6 вихорострумового перетворювача 5 та є першим входом модулятора 8, другий сигнальний вхід першого комутатора 9 і перший сигнальний вхід другого комутатора 10 під'єднані до точки з'єднання першої 6 і другої 7 обмоток вихорострумового перетворювача 5 і є другим входом модулятора 8, другий сигнальний вхід другого комутатора 10 під'єднаний до точки з'єднання підсилювача потужності 4 і другої обмотки 7 вихорострумового перетворювача 5 і є третім входом модулятора 8, керуючі входи комутаторів 9, 10 з'єднані між собою і є керуючим входом модулятора 8, вихід першого комутатора 9 з'єднаний з першим входом першого диференційного підсилювача 11, вихід другого комутатора 10 з'єднаний з другим входом першого диференційного підсилювача 11, а вихід першого диференційного підсилювача 11 є виходом модулятора 8, другого смугового фільтра 12, першого синхронного детектора 13, підсилювача змінного струму 14 та другого синхронного детектора 15, другого 16 та третього 17 диференційних підсилювачів, послідовно з'єднаних першого суматора 18, диференціатора 19, першого перемикача 20 та компаратора 21, послідовно з'єднаних третього смугового фільтра 22 і другого суматора 23, послідовно зустрічно з'єднаних третьої 24 і четвертої 25 обмоток, що введені у вихорострумовий перетворювач, послідовно з'єднаних подільника напруги 26, другого перемикача 27, четвертого смугового фільтра 28 і третього синхронного детектора 29, послідовно з'єднаних третього суматора 30, мікроконтролера з вбудованим аналого-цифровим перетворювачем 31 та зовнішнього запам'ятовувального пристрою 32, індикатора, причому керуючий вхід модулятора 8 та керуючий вхід першого синхронного детектора 13 з'єднані з виходом генератора 1 прямокутних імпульсів, перший вхід другого диференційного підсилювача 16 з'єднаний з першим входом модулятора 8, другий вхід другого диференційного підсилювача 16 та перший вхід третього диференційного підсилювача 17 з'єднані з другим входом модулятора 8, другий вхід третього диференційного підсилювача 17 з'єднаний з третім входом модулятора 8, перший вхід першого суматора 18 з'єднаний з виходом другого диференційного підсилювача 16, другий вхід першого суматора 18 з'єднаний з виходом третього диференційного підсилювача 17, другий вхід першого перемикача 20 з'єднаний з входом диференціатора 19, керуючий вхід другого синхронного детектора 15 з'єднаний з виходом компаратора 21, подільник частоти 2 має другий вихід, до якого під'єднано керуючий вхід третього синхронного детектора 29 та вхід третього смугового фільтра 22, другий вхід другого суматора 23 з'єднаний з виходом першого смугового фільтра 3, вихід другого суматора 23 з'єднаний з входом підсилювача потужності 4, перший вивід третьої обмотки 24 вихорострумового перетворювача 5 під'єднаний до входу подільника напруги 26, другий вивід четвертої обмотки 25 вихорострумового перетворювача 5 та другий вхід другого перемикача 27 під'єднані до загальної ши-

ни, вихід третього синхронного детектора 29 з'єднаний з першим входом третього суматора 30, вихід другого синхронного детектора 15 з'єднаний з другим входом третього суматора 30, вихід третього суматора 30 з'єднаний з входом індикатора 33.

Пристрій працює таким чином.

Генератор 1 прямокутних імпульсів формує послідовність імпульсів зі шпаруватістю два та частотою Ω . При цьому на першому виході подільника частоти 2 формується послідовність імпульсів з частотою ω , на другому його виході - з частотою $m\omega$. Перша гармоніка низькочастотного

$$u_1(t) = U_1 \sin(\omega t + \varphi_1) + U'_1 \sin(m\omega t + m\varphi_1) \quad u_2(t) = U_2 \sin(\omega t + \varphi_2) + U'_2 \sin(m\omega t + m\varphi_2) \quad (1)$$

де U_1, U_2 - відповідно амплітуди складових сигналу з частотою ω на першій 6 та другій 7 обмотках вихорострумного перетворювача 5;

φ_1, φ_2 - відповідно початкові фази складових сигналу з частотою ω на першій 6 та другій 7 обмотках вихорострумного перетворювача 5;

m - коефіцієнт, що визначає у скільки разів частота високочастотної складової сигналу більша від частоти низькочастотної;

U'_1, U'_2 - відповідно амплітуди складових сигналу з частотою та на першій 6 та другій 7 обмотках вихорострумного перетворювача 5;

$m\varphi_1' = m(\varphi + \varphi_1'')$, $m\varphi_2' = m(\varphi + \varphi_2'')$ - відповідно початкові фази складових сигналу з частотою

$$\begin{aligned} U_M(t) = & K_M \frac{U_1 + U_2}{2} \left[1 + \frac{U_1 - U_2}{U_1 + U_2} \cdot \text{sign} \sin(\Omega t + \varphi) \right] \cdot \sin \left\{ \omega t + \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2} \left[1 + \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{\varphi_1 + \varphi_2} \cdot \text{sign} \sin(\Omega t + \varphi) \right] \right\} + \\ & + K_M \frac{U'_1 + U'_2}{2} \left[1 + \frac{U'_1 - U'_2}{U'_1 + U'_2} \cdot \text{sign} \sin(\Omega t + \varphi) \right] \cdot \sin \left\{ m\omega t + \frac{\varphi_1' + \varphi_2'}{2} \left[1 + \frac{\varphi_1' - \varphi_2'}{\varphi_1' + \varphi_2'} \cdot \text{sign} \sin(\Omega t + \varphi) \right] \right\} = \\ = & K_M \left\{ \frac{U_1 + U_2}{2} \sin \left\{ \omega t + \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2} + \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2} \cdot \text{sign} \sin(\Omega t + \varphi) \right\} + \right. \\ & + \frac{U_1 - U_2}{2} \text{sign} \sin(\Omega t + \varphi) \cdot \sin \left\{ \omega t + \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2} + \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2} \cdot \text{sign} \sin(\Omega t + \varphi) \right\} \left. \right\} + \\ & + K_M \left\{ \frac{U'_1 + U'_2}{2} \sin \left\{ \omega t + \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2} + \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2} \cdot \text{sign} \sin(\Omega t + \varphi) \right\} + \right. \\ & + \frac{U'_1 - U'_2}{2} \text{sign} \sin(\Omega t + \varphi) \cdot \sin \left\{ m\omega t + \frac{\varphi_1' + \varphi_2'}{2} + \frac{\varphi_1' - \varphi_2'}{2} \cdot \text{sign} \sin(\Omega t + \varphi) \right\} \left. \right\}, \end{aligned} \quad (2)$$

де φ - початкова фаза комутуючого сигналу;

Ω - частота комутації;

K_M - коефіцієнт передачі модулятора 8;

$U_K \text{sign} \sin(\Omega t + \varphi)$ - керуючий вихідний сигнал генератора 1;

сигналу з першого виходу подільника частоти 2 виділяється першим смуговим фільтром 3, а третій смуговий фільтр 22 виділяє з сигналу на другому виході подільника частоти 2 гармоніку з частотою $m\omega$. Ці гармоніки подаються відповідно на перший та другий входи третього суматора 33. Сумарний сигнал надходить на підсилювач потужності 4, а далі на вихорострумний перетворювач 5.

На першій обмотці 6 вихорострумного перетворювача 5 діє напруга $u_1(t)$, а на другій 7 - напруга $u_2(t)$, які є сумою двох гармонік з частотами ω та $m\omega$:

та ж першій 6 та другій 7 обмотках вихорострумного перетворювача 5;

$m\varphi_1'', m\varphi_2''$ - відповідно зсув фази на третій 24 та четвертій 25 обмотках вихорострумного перетворювача 5.

В перший півперіод комутації на перший вхід модулятора 8 надходить напруга з першої обмотки 6 вихорострумного перетворювача 5, а в другий півперіод комутації - напруга з другої обмотки 7 вихорострумного перетворювача 5.

Оскільки модулятор 8 можна вважати квазілінійною схемою, для якої справедливий закон суперпозиції, то амплітудно-фазомодульований сигнал на його виході можна записати так:

U_K - амплітуда керуючого сигналу.

Після тригонометричних перетворень виразу (2) отримаємо:

$$\begin{aligned}
U_M(t) = & K_M \frac{U_1 - U_2}{2} \operatorname{sign} \sin(\Omega t + \varphi) \cdot \left\{ \sin\left(\omega t + \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2}\right) \cos \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2} + \operatorname{sign} \sin(\Omega t + \varphi) \cos\left(\omega t + \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2}\right) \sin \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2} \right\} + \\
& + K_M \frac{U_1 + U_2}{2} \left\{ \sin\left(\omega t + \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2}\right) \cos \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2} + \operatorname{sign} \sin(\Omega t + \varphi) \cos\left(\omega t + \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2}\right) \sin \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2} \right\} + \\
& + K_M \frac{U_1' - U_2'}{2} \operatorname{sign} \sin(\Omega t + \varphi) \cdot \\
& \cdot \left\{ \sin\left(m\omega t + \frac{\varphi_1' + \varphi_2'}{2}\right) \cos \frac{\varphi_1' - \varphi_2'}{2} + \operatorname{sign} \sin(\Omega t + \varphi) \cos\left(m\omega t + \frac{\varphi_1' + \varphi_2'}{2}\right) \sin \frac{\varphi_1' - \varphi_2'}{2} \right\} + \\
& + K_M \frac{U_1' + U_2'}{2} \left\{ \sin\left(m\omega t + \frac{\varphi_1' + \varphi_2'}{2}\right) \cos \frac{\varphi_1' - \varphi_2'}{2} + \operatorname{sign} \sin(\Omega t + \varphi) \cos\left(m\omega t + \frac{\varphi_1' + \varphi_2'}{2}\right) \sin \frac{\varphi_1' - \varphi_2'}{2} \right\}.
\end{aligned} \quad (3)$$

Другий смуговий фільтр 12 пропускає частоти близькі до Ω , а решту частот затримує, тому на виході другого смугового фільтра 12 (з врахуван-

ням того, що $\operatorname{sign} \sin(\Omega t + \varphi) = \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(2n-1)(\Omega t + \varphi)}{(2n-1)}$ маємо:

$$\begin{aligned}
U_{SF12}(t) \cong & K_M K_{SF12} \frac{U_1 - U_2}{\pi} \cdot \cos \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2} \cdot \left[\cos\left((\Omega - \omega)t + \varphi - \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2}\right) - \cos\left((\Omega + \omega)t + \varphi + \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2}\right) \right] + \\
& + K_M K_{SF12} \frac{U_1 + U_2}{\pi} \cdot \sin \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2} \cdot \left\{ \cos\left[(\Omega - \omega)t + \varphi - \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2} - \frac{\pi}{2}\right] - \cos\left[(\Omega + \omega)t + \varphi + \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2} + \frac{\pi}{2}\right] \right\} + \\
& + K_M K_{SF12} \frac{U_1' - U_2'}{\pi} \cdot \cos \frac{\varphi_1' - \varphi_2'}{2} \cdot \left[\cos\left((\Omega - m\omega)t + \varphi - \frac{\varphi_1' + \varphi_2'}{2}\right) - \cos\left((\Omega + m\omega)t + \varphi + \frac{\varphi_1' + \varphi_2'}{2}\right) \right] + \\
& + K_M K_{SF12} \frac{U_1' + U_2'}{\pi} \cdot \sin \frac{\varphi_1' - \varphi_2'}{2} \cdot \left\{ \cos\left[(\Omega - m\omega)t + \varphi - \frac{\varphi_1' + \varphi_2'}{2} - \frac{\pi}{2}\right] - \cos\left[(\Omega + m\omega)t + \varphi + \frac{\varphi_1' + \varphi_2'}{2} + \frac{\pi}{2}\right] \right\},
\end{aligned} \quad (4)$$

де K_{SF12} - коефіцієнт передачі смугового фільтра 12.

Перший синхронний детектор 13 керується вихідним сигналом $U_K \operatorname{sign} \sin(\Omega t + \varphi)$ генератора 1.

В перший півперіод керуючої напруги перший синхронний детектор 13 подає на вихід вхідний сигнал, в другий півперіод керуючої напруги - сигнал протифазний до вхідного. Тобто напруга на виході першого синхронного детектора 13:

$$\begin{aligned}
U_{SD13}(t) \cong & K_M K_{SF12} \frac{2(U_1 - U_2)}{\pi^2} \cos \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2} \cdot \left\{ \sin\left(\omega t + \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2}\right) + \right. \\
& + \sin\left(2\Omega t + \varphi - \omega t - \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2}\right) - \sin\left(-\omega t - \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2}\right) - \sin\left(2\Omega t + \varphi + \omega t + \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2}\right) \left. \right\} + \\
& + K_M K_{SF12} \frac{2(U_1 + U_2)}{\pi^2} \sin \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2} \cdot \left\{ \sin\left(\omega t + \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2} + \frac{\pi}{2}\right) + \sin\left(2\Omega t - \omega t + 2\varphi - \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2} - \frac{\pi}{2}\right) - \right. \\
& - \sin\left(-\omega t - \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2} - \frac{\pi}{2}\right) - \sin\left(2\Omega t + \omega t + 2\varphi + \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2} + \frac{\pi}{2}\right) \left. \right\} + \\
& + K_M K_{SF12} \frac{2(U_1' - U_2')}{\pi^2} \cos \frac{\varphi_1' - \varphi_2'}{2} \cdot \left\{ \sin\left(m\omega t + \frac{\varphi_1' + \varphi_2'}{2}\right) + \right. \\
& + \sin\left(2\Omega t + \varphi - m\omega t - \frac{\varphi_1' + \varphi_2'}{2}\right) - \sin\left(-m\omega t - \frac{\varphi_1' + \varphi_2'}{2}\right) - \sin\left(2\Omega t + \varphi + m\omega t + \frac{\varphi_1' + \varphi_2'}{2}\right) \left. \right\} + \\
& + K_M K_{SF12} \frac{2(U_1' + U_2')}{\pi^2} \sin \frac{\varphi_1' - \varphi_2'}{2} \cdot \left\{ \sin\left(m\omega t + \frac{\varphi_1' + \varphi_2'}{2} + \frac{\pi}{2}\right) + \sin\left(2\Omega t - m\omega t + 2\varphi - \frac{\varphi_1' + \varphi_2'}{2} - \frac{\pi}{2}\right) - \right. \\
& - \sin\left(-m\omega t - \frac{\varphi_1' + \varphi_2'}{2} - \frac{\pi}{2}\right) - \sin\left(2\Omega t + m\omega t + 2\varphi + \frac{\varphi_1' + \varphi_2'}{2} + \frac{\pi}{2}\right) \left. \right\}.
\end{aligned} \quad (5)$$

З врахуванням вихідного низькочастотного фільтра першого синхронного детектора 13 і за умови, що $m\omega \gg \omega$ з (5) отримаємо:

$$U_{SD13}(t) \cong K_M K_{SF12} K_{SD13} \frac{4(U_1 - U_2)}{\pi^2} \cos \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2} \cdot \sin \left(\omega t + \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2} \right) +$$

$$+ K_M K_{SF12} K_{SD13} \frac{4(U_1 + U_2)}{\pi^2} \sin \left(\frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2} \right) \cdot \sin \left(\omega t + \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2} + \frac{\pi}{2} \right), \quad (6)$$

де K_{SD13} - коефіцієнт передачі першого синхронного детектора 13 в околі частоти ω .

Різниця амплітуд напруг ($U_1 - U_2$) пропорційна до синфазної складової, а синус різниці фаз $\sin \left(\frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2} \right)$ - до квадратурної складової сигналу.

Обидві ці складові пропорційні до товщини вимірюваної сталевий листової конструкції. Після цього сигнал проходить через підсилювач змінного струму 14, а далі надходить на вхід другого синхронного детектора 15. Другий синхронний детектор 15 керується сигналом прямокутної форми з виходу компаратора 21.

При під'єднанні перемикачем 20 виходу диференціатора 19 до входу компаратора 21 формується сигнал, який дозволяє детектувати синфазну складову сигналу (6), а отже забезпечувати вимірювання різниці амплітуд ($U_1 - U_2$). Цей сигнал має вигляд:

$$U_{SD15S}(t) = K_M K_{SF12} K_{SD13} K_{P14} K_{SD15} \frac{4}{\pi^2} (U_1 - U_2) \cos \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2} \cdot \sin \left(\omega t + \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2} \right) \cdot \text{sign} \sin \left(\omega t + \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2} \right) +$$

$$+ K_M K_{SF12} K_{SD13} K_{P14} K_{SD15} \frac{4(U_1 + U_2)}{\pi^2} \sin \left(\frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2} \right) \sin \left(\omega t + \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2} + \frac{\pi}{2} \right) \cdot \text{sign} \sin \left(\omega t + \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2} \right) =$$

$$= K_M K_{SF12} K_{SD13} K_{P14} K_{SD15} \frac{4}{\pi^2} (U_1 - U_2) \cos \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2} \cdot \sin \left(\omega t + \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2} \right) \cdot \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(2n-1) \left(\omega t + \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2} \right)}{(2n-1)} +$$

$$+ K_M K_{SF12} K_{SD13} K_{P14} K_{SD15} \frac{4(U_1 + U_2)}{\pi^2} \sin \left(\frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2} \right) \sin \left(\omega t + \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2} + \frac{\pi}{2} \right) \cdot \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(2n-1) \left(\omega t + \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2} \right)}{(2n-1)}. \quad (9)$$

де K_{SD15} - коефіцієнт передачі другого синхронного детектора 15.

$$U_{SD15S} = K_M K_{SF12} K_{SD13} K_{P14} K_{SD15} \frac{4}{\pi^2} (U_1 - U_2) \cos \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2} \cdot \sin \left(\omega t + \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2} \right) \cdot \frac{4}{\pi} \sin \left(\omega t + \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2} \right) +$$

$$+ K_M K_{SF12} K_{SD13} K_{P14} K_{SD15} \frac{4(U_1 + U_2)}{\pi^2} \sin \left(\frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2} \right) \sin \left(\omega t + \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2} + \frac{\pi}{2} \right) \cdot \frac{4}{\pi} \sin \left(\omega t + \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2} \right) =$$

$$= K_M K_{SF12} K_{SD13} K_{P14} K_{SD15} \frac{8}{\pi^2} (U_1 - U_2) \cos \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2}. \quad (10)$$

З врахуванням впливу щілини вираз (10) можна записати так:

$$U_{SD15S} = S_s (U_1 - U_2) - S_{\gamma n} \gamma, \quad (11)$$

де $S_s = K_M K_{SF12} K_{SD13} K_{P14} K_{SD15} \frac{8}{\pi^2} \cos \left(\frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2} \right)$ - коефіцієнт перетворення синфазної складової в постійну напругу; γ - щілина між вихорострумовим перетворювачем і поверхнею листової конс-

$$U_{KOM}(t) = U_{KM} \text{sign} \sin \left(\omega t + \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2} \right), \quad (7)$$

U_{KM} - амплітуда прямокутного керуючого сигналу на виході компаратора, а при під'єднанні входу компаратора 21 до входу диференціатора 19 матимемо сигнал, який дозволяє детектувати квадратурну складову сигналу

(6), а тому забезпечувати вимірювання синуса різниці фаз $\sin \left(\frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2} \right)$. Такий сигнал можна записати так:

$$U_{KOM}(t) = U_{KM} \text{sign} \sin \left(\omega t + \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2} + \frac{\pi}{2} \right), \quad (8)$$

При використанні сигналу (7) для керування синхронним детектором 15 на його виході отримаємо напругу, пропорційну вимірюваній синфазній складовій:

З врахуванням вихідного фільтра низької частоти другого синхронного детектора 15, який затримує вищі частоти, при вимірюванні одержимо постійну складову:

трукції; $S_{\gamma n}$ - коефіцієнт перетворення щілини в напругу на виході другого синхронного детектора 15 при вимірюванні синфазної складової.

При використанні сигналу (8) для керування синхронним детектором 15 на його виході буде отримано напругу, пропорційну вимірюваній квадратурній складовій:

$$U_{SD15S}(t) = K_M K_{SF12} K_{SD13} K_{P14} K_{SD15} \frac{4(U_1 + U_2)}{\pi^2} \sin\left(\frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2}\right) \cdot \sin\left(\omega t + \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2} + \frac{\pi}{2}\right) \cdot \text{sign} \sin\left(\omega t + \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2} + \frac{\pi}{2}\right) =$$

$$= K_M K_{SF12} K_{SD13} K_{P14} K_{SD15} \frac{4(U_1 + U_2)}{\pi^2} \sin\left(\frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2}\right) \cdot \sin\left(\omega t + \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2} + \frac{\pi}{2}\right) \cdot \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(2n-1)\left(\omega t + \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2} + \frac{\pi}{2}\right)}{(2n-1)}. \quad (12)$$

З врахуванням вихідного фільтра низької частоти другого синхронного детектора 15, який за-

$$U_{SD15S} = K_M K_{SF12} K_{SD13} K_{P14} K_{SD15} \frac{4(U_1 + U_2)}{\pi^2} \sin\left(\frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2}\right) \cdot \sin\left(\omega t + \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2} + \frac{\pi}{2}\right) \cdot \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(2n-1)\left(\omega t + \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2} + \frac{\pi}{2}\right)}{(2n-1)} =$$

$$= K_M K_{SF12} K_{SD13} K_{P14} K_{SD15} \frac{8(U_1 + U_2)}{\pi^3} \sin\left(\frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2}\right). \quad (13)$$

З врахуванням впливу щілини вираз (13) можна записати так:

$$U_{SD15K} = S_K \sin\left(\frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2}\right) - S_{\gamma n}, \quad (14)$$

де $S_K = K_M K_{SF12} K_{SD13} K_{P14} K_{SD15} \frac{8(U_1 + U_2)}{\pi^3}$ - коефіцієнт перетворення квадратурної складової в постійну напругу; $S_{\gamma n}$ - коефіцієнт перетворення щілини в напругу на виході другого синхронного детектора 15 при вимірюванні квадратурної складової.

$$U_{24-25}(t) = u_1'(t) - u_2'(t) = k_1 [U_1 \sin(\omega t + \varphi_1) + U_1' \sin(m\omega t + m\varphi_1')] - k_2 [U_2 \sin(\omega t + \varphi_2) + U_2' \sin(m\omega t + m\varphi_2')] \quad (15)$$

де k_1, k_2 - коефіцієнти трансформації між першою 6 і третьою 24 та другою 7 і четвертою 25 обмотками вихорострумowego перетворювача 5.

$$U_{SF28}(t) \cong K_{SF28} [k_1 U_1' \sin(m\omega t + m\varphi_1') - k_2 U_2' \sin(m\omega t + m\varphi_2')] \quad (16)$$

де K_{SF28} - коефіцієнт передачі четвертого смугового фільтра 28.

На виході третього синхронного детектора 29, який керується сигналом

тримує вищі частоти, при вимірюванні одержимо постійну складову:

Далі сигнал з виходу другого синхронного детектора 15 додається третім суматором 30 до сигналу з виходу третього синхронного детектора 29. Визначимо вигляд сигналу з виходу третього синхронного детектора 29.

На третій обмотці 24 вихорострумowego перетворювача 5 діє напруга $u_1'(t)$, а на четвертій 25 - напруга $u_2'(t)$.

Сигнал на вході четвертого смугового фільтра 28 матиме вигляд:

На виході четвертого смугового фільтра 28, який пропускає лише частоти близькі до $m\omega t$, отримаємо:

$$\text{sign} \sin(m\omega t + m\varphi) = \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(2n-1)(m\omega t - m\varphi)}{(2n-1)} \quad \text{з другого}$$

виходу подільника частоти 2, будемо мати:

$$U_{SD29}(t) \cong K_{SF28} K_{SD29} [k_1 U_1' \sin(m\omega t + m\varphi_1') - k_2 U_2' \sin(m\omega t + m\varphi_2')] \cdot \text{sign} \sin(m\omega t + m\varphi) =$$

$$= K_{SF28} K_{SD29} [k_1 U_1' \sin(m\omega t + m\varphi_1') - k_2 U_2' \sin(m\omega t + m\varphi_2')] \cdot \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(2n-1)(m\omega t - m\varphi)}{(2n-1)} =$$

$$= K_{SF28} K_{SD29} \left[\frac{4k_1 U_1'}{\pi} \sin(m\omega t + m\varphi) \sin(m\omega t + m\varphi_1') - \frac{4k_2 U_2'}{\pi} \sin(m\omega t + m\varphi) \sin(m\omega t + m\varphi_2') \right] = \quad (17)$$

$$= K_{SF28} K_{SD29} \left[\frac{2k_1 U_1'}{\pi} [\cos(m\omega t + m\varphi - m\omega t + m\varphi_1') - \cos(m\omega t + m\varphi + m\omega t + m\varphi_1')] - \right.$$

$$\left. - \frac{2k_2 U_2'}{\pi} [\cos(m\omega t + m\varphi - m\omega t + m\varphi_2') - \cos(m\omega t + m\varphi + m\omega t + m\varphi_2')] \right].$$

де K_{SD29} - коефіцієнт передачі третього синхронного детектора 29.

З врахуванням вихідного низькочастотного фільтра третього синхронного детектора 29, який пропускає лише постійну складову і того, що $m\varphi_1' = m(\varphi + \varphi_1'')$ та $m\varphi_2' = m(\varphi + \varphi_2'')$, матимемо:

$$U_{SD29} \cong K_{SF28} K_{SD29} \left[\frac{2k_1 U_1'}{\pi} \cos(m\omega t + m\varphi - m\omega t - m\varphi_1') - \frac{2k_2 U_2'}{\pi} \cos(m\omega t + m\varphi - m\omega t - m\varphi_2') \right] =$$

$$= \frac{K_{SF28} K_{SD29}}{\pi} [k_1 U_1' \cos(m\varphi_1'') - k_2 U_2' \cos(m\varphi_2'')] \quad (18)$$

При $k_1=k_2=k$ і $\cos(m\varphi_1'') = \cos(m\varphi_2'') = \text{const}$ вираз (18) можна записати так:

$$U_{SD29} \cong \frac{K_{SF28} K_{SD29}}{\pi} k \cos(m\varphi_1'') [U_1' - U_2'] = S_{\gamma n} \cdot \gamma \quad (19)$$

де $S_{\gamma n}$ - коефіцієнт перетворення щілини в напругу на виході третього синхронного детектора 29.

Отже, на виході третього суматора 30 отримаємо суму сигналів з виходів третього 29 та другого

15 синхронних детекторів. При вимірюванні синфазної складової використовується вихідний сигнал (10) другого синхронного детектора 15, в результаті чого на виході третього суматора 30 буде:

$$U_{SUM30} \cong S_S (U_1 - U_2) - S_{\gamma n} \gamma + S_{\gamma v} \gamma = S_S (U_1 - U_2) + \gamma (S_{\gamma v} - S_{\gamma n}) = S_S (U_1 - U_2) + \gamma \cdot \Delta S_{\gamma}, \quad (20)$$

де ΔS_{γ} - різниця коефіцієнтів перетворення в напругу щілини низькочастотного та високочастотного сигналів відповідно при вимірюванні синфазної складової.

Як видно з (20), вплив щілини зменшується в $S_{\gamma n} / \Delta S_{\gamma}$ раз.

$$U_{SUM30} \cong S_K \sin\left(\frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2}\right) - S_{\gamma n}' \gamma + S_{\gamma v} \gamma = S_K \sin\left(\frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2}\right) + \gamma (S_{\gamma v} - S_{\gamma n}') = S_K \sin\left(\frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2}\right) + \gamma \cdot \Delta S_{\gamma}', \quad (21)$$

де $\Delta S_{\gamma}'$ - різниця коефіцієнтів перетворення в напругу щілини низькочастотного та високочастотного сигналів відповідно при вимірюванні синфазної складової.

З (21) бачимо, що вплив щілини зменшується в $S_{\gamma n}' / \Delta S_{\gamma}'$ раз.

Після цього сигнал (20) або (21) надходить на аналого-цифровий перетворювач мікроконтролера 31. Вже оцифрований сигнал заноситься в запам'ятовувальний пристрій 32. Оброблення даних з

А при вимірюванні квадратурної складової використовується вихідний сигнал (13) другого синхронного детектора 15, тому на виході третього суматора 30 одержимо:

запам'ятовувального пристрою 32 та інтерпретація їх у товщину листової конструкції може проводитися в режимі on-line або off-line залежно від конкретної задачі.

Отже запропонована корисна модель забезпечує зменшення впливу щілини при вимірюванні як синфазної так і квадратурної складових сигналу. За цими результатами можна більш точно оцінити товщину сталевих листа та зробити висновки про його корозійний стан.



