



УКРАЇНА

(19) UA

(11) 57135

(13) C2

(51) 7 G01R25/00

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

## (54) СПОСІБ ВИМІРЮВАННЯ ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ ПОСЛІДОВНИХ РЕЗОНАНСНИХ КОНТУРІВ

1

2

(21) 2000105962

(22) 23 10 2000

(24) 16 06 2003

(46) 16 06 2003, Бюл №6, 2003р

(72) Рудик Андрій Вікторович

(73) ВІННИЦЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ТЕХНІЧНИЙ  
УНІВЕРСИТЕТ

(56) Рудик А В Фазовий метод вимірювання добротності резонансних контурів//Прогресивні матеріали, технології та обладнання в машино- і приладобудуванні Тези доповідей 4-ої науково-технічної конференції - Тернопіль - 2000 - С 81

(57) Спосіб вимірювання основних параметрів послідовних резонансних контурів, який полягає в тому, що в послідовному колі з досліджуваного послідовного резонансного контуру та зразкового опору на двох частотах вимірюють значення кута фазового зсуву між напругами на цих елементах, який відрізняється тим, що на одній з двох частот додатково вимірюють відношення амплітуд напруг на досліджуваному послідовному резонансному контурі та зразковому опору, а значення основних параметрів послідовного резонансного контуру визначають за такими формулами

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{\omega_1 \omega_2 (\omega_2 \operatorname{tg} \varphi_1 - \omega_1 \operatorname{tg} \varphi_2)}{\omega_1 \operatorname{tg} \varphi_1 - \omega_2 \operatorname{tg} \varphi_2}},$$

$$Q = \frac{\sqrt{\omega_1 \omega_2 (\omega_2 \operatorname{tg} \varphi_1 - \omega_1 \operatorname{tg} \varphi_2) (\omega_1 \operatorname{tg} \varphi_1 - \omega_2 \operatorname{tg} \varphi_2)}}{\omega_1^2 - \omega_2^2},$$

$$r_K = A_1 R_0 \cos \varphi_1,$$

$$\rho = r_K Q = \frac{A_1 R_0 \cos \varphi_1 \sqrt{\omega_1 \omega_2 (\omega_2 \operatorname{tg} \varphi_1 - \omega_1 \operatorname{tg} \varphi_2) (\omega_1 \operatorname{tg} \varphi_1 - \omega_2 \operatorname{tg} \varphi_2)}}{\omega_1^2 - \omega_2^2},$$

$$R_{EP} = r_K = A_1 R_0 \cos \varphi_1,$$

$$L = \frac{\rho}{\omega_0} = \frac{A_1 R_0 (\omega_1 \operatorname{tg} \varphi_1 - \omega_2 \operatorname{tg} \varphi_2) \cos \varphi_1}{\omega_1^2 - \omega_2^2},$$

$$C = \frac{1}{\omega_0 \rho} = \frac{\omega_1^2 - \omega_2^2}{A_1 R_0 \omega_1 \omega_2 (\omega_2 \operatorname{tg} \varphi_1 - \omega_1 \operatorname{tg} \varphi_2) \cos \varphi_1},$$

$$\alpha = \frac{r_K}{2L} = \frac{\omega_0}{2Q} = \frac{\omega_1^2 - \omega_2^2}{2(\omega_1 \operatorname{tg} \varphi_1 - \omega_2 \operatorname{tg} \varphi_2)},$$

$$2\Delta\omega = \frac{\omega_0}{Q} = 2\alpha = \frac{\omega_1^2 - \omega_2^2}{\omega_1 \operatorname{tg} \varphi_1 - \omega_2 \operatorname{tg} \varphi_2},$$

де  $\omega_0$  – резонансна частота послідовного резонансного контуру, $Q$  – добротність послідовного резонансного контуру, $\rho$  – характеристичний опір послідовного резонансного контуру, $L$  – індуктивність послідовного резонансного контуру, $C$  – ємність послідовного резонансного контуру, $r_K$  – опір втрат послідовного резонансного контуру, $\alpha$  – коефіцієнт загасання послідовного резонансного контуру, $2\Delta\omega$  – смуга пропускання послідовного резонансного контуру, $R_{EP}$  – еквівалентний резонансний опір послідовного резонансного контуру, $R_0$  – опір зразкового резистора вимірювального перетворювача, $\omega_1$  та  $\omega_2$  – частоти вхідної напруги вимірювального перетворювача, на яких проводять вимірювання, $\varphi_1$  та  $\varphi_2$  – фазові зсуви між напругами на зразковому опорі та досліджуваному послідовному резонансному контурі на частотах  $\omega_1$  та  $\omega_2$  відповідно, $A_1$  – відношення амплітуд напруг на досліджуваному послідовному резонансному контурі та зразковому опорі на частоті  $\omega_1$ 

Винахід відноситься до вимірювальної техніки та може використовуватися для визначення основних параметрів (характеристичний опір, опір

втрат, добротність, індуктивність, ємність, резонансна частота, смуга пропускання, еквівалентний

(13) C2

(11) 57135

(19) UA

резонансний опір) послідовних резонансних контурів

Відомий спосіб вимірювання основних параметрів (добротності та резонансної частоти) послідовних резонансних контурів шляхом налаштування в резонанс послідовного резонансного контуру (резонансний метод) за електронним вольтметром, шкала якого проградуєвана в значеннях добротності (Кукуш В Д., Электрорадиоизмерения - М Радио и связь, 1985 - С 310)

Недоліками вказаного способу є те, що він не дозволяє виміряти інші параметри послідовних резонансних контурів (смуга пропускання, еквівалентний резонансний опір і т.п.) без суттєвого ускладнення процедури вимірювання, а також не дозволяє в достатній мірі автоматизувати процес вимірювання

За прототип обраний спосіб вимірювання основних параметрів послідовних резонансних контурів (Рудик А В Фазовий метод вимірювання добротності резонансних контурів//Прогресивні матеріали, технології та обладнання в машино- і приладобудуванні Тези доповідей 4-ої науково-технічної конференції – Тернопіль – 2000 – С 81), який полягає в тому, що в послідовному колі, яке складається зі зразкового опору та досліджуваного послідовного резонансного контуру, на двох частотах вимірюють значення кута фазового зсуву між напругою на зразковому опорі та досліджуваному послідовному резонансному контуру, а також значення цих частот, після чого за отриманими результатами вимірювань обчислюють значення резонансної частоти та добротності послі-

довного резонансного контуру

Недоліком вказаного способу є вузькі функціональні можливості, які обумовлені тим, що він не дозволяє виміряти інші параметри послідовних резонансних контурів (характеристичний опір, коефіцієнт загасання і т.п.) без суттєвого ускладнення процедури вимірювання

В основу винаходу покладена задача створення способу вимірювання основних параметрів послідовних резонансних контурів, в якому за рахунок того, що додатково вимірюють відношення амплітуд напруг на досліджуваному послідовному резонансному контуру та зразковому опорі, забезпечується можливість обчислення інших параметрів послідовних резонансних контурів (ємність, індуктивність, характеристичний опір і т.п.), і за рахунок цього розширюються функціональні можливості виміральної апаратури, що реалізує запропонований спосіб вимірювання

Поставлена задача вирішується тим, що в способі вимірювання основних параметрів послідовних резонансних контурів, при якому в послідовному колі з досліджуваного послідовного резонансного контуру та зразкового опору на двох частотах вимірюють значення кута фазового зсуву між напругами на цих елементах, згідно винаходу на одній з двох частот додатково вимірюють відношення амплітуд напруг на досліджуваному послідовному резонансному контуру та зразковому опорі, при цьому значення основних параметрів послідовного резонансного контуру визначають за такими формулами

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{\omega_1 \omega_2 (\omega_2 \operatorname{tg} \varphi_1 - \omega_1 \operatorname{tg} \varphi_2)}{\omega_1 \operatorname{tg} \varphi_1 - \omega_2 \operatorname{tg} \varphi_2}},$$

$$Q = \frac{\sqrt{\omega_1 \omega_2 (\omega_2 \operatorname{tg} \varphi_1 - \omega_1 \operatorname{tg} \varphi_2) (\omega_1 \operatorname{tg} \varphi_1 - \omega_2 \operatorname{tg} \varphi_2)}}{\omega_1^2 - \omega_2^2},$$

$$r_k = A_1 R_0 \cos \varphi_1;$$

$$\rho = r_k Q = \frac{A_1 R_0 \cos \varphi_1 \sqrt{\omega_1 \omega_2 (\omega_2 \operatorname{tg} \varphi_1 - \omega_1 \operatorname{tg} \varphi_2) (\omega_1 \operatorname{tg} \varphi_1 - \omega_2 \operatorname{tg} \varphi_2)}}{\omega_1^2 - \omega_2^2},$$

$$R_{\text{вп}} = r_k = A_1 R_0 \cos \varphi_1;$$

$$L = \frac{\rho}{\omega_0} = \frac{A_1 R_0 (\omega_1 \operatorname{tg} \varphi_1 - \omega_2 \operatorname{tg} \varphi_2) \cos \varphi_1}{\omega_1^2 - \omega_2^2},$$

$$C = \frac{1}{\omega_0 \rho} = \frac{\omega_1^2 - \omega_2^2}{A_1 R_0 \omega_1 \omega_2 (\omega_2 \operatorname{tg} \varphi_1 - \omega_1 \operatorname{tg} \varphi_2) \cos \varphi_1};$$

$$\alpha = \frac{r_k}{2L} = \frac{\omega_0}{2Q} = \frac{\omega_1^2 - \omega_2^2}{2(\omega_1 \operatorname{tg} \varphi_1 - \omega_2 \operatorname{tg} \varphi_2)};$$

$$2\Delta\omega = \frac{\omega_0}{Q} = 2\alpha = \frac{\omega_1^2 - \omega_2^2}{\omega_1 \operatorname{tg} \varphi_1 - \omega_2 \operatorname{tg} \varphi_2},$$

де  $\omega_0$  – резонансна частота послідовного резонансного контуру,

$Q$  – добротність послідовного резонансного контуру,

$\rho$  – характеристичний опір послідовного резо-

нансного контуру,

$L$  – індуктивність послідовного резонансного контуру,

$C$  – ємність послідовного резонансного контуру,

$r_k$  – опір втрат послідовного резонансного контуру,

$\alpha$  – коефіцієнт загасання послідовного резонансного контуру,

$2\Delta\omega$  – смуга пропускання послідовного резонансного контуру,

$R_{EP}$  – еквівалентний резонансний опір послідовного резонансного контуру,

$R_0$  – опір зразкового резистора вимірювального перетворювача,

$\omega_1$  та  $\omega_2$  – частоти входної напруги вимірювального перетворювача, на яких проводять вимірювання,

$\varphi_1$  та  $\varphi_2$  – фазові зсуви між напругами на зразковому опорі та досліджуваному послідовному резонансному контуру на частотах  $\omega_1$  та  $\omega_2$  відповідно,

$A_1$  – відношення амплітуд напруг на досліджуваному послідовному резонансному контуру та зразковому опорі на частоті  $\omega_1$

Введення операції вимірювання відношення амплітуд напруг на досліджуваному послідовному резонансному контуру та зразковому опорі призводить до забезпечення можливості обчислення інших параметрів послідовних резонансних контурів (ємність, індуктивність, характеристичний опір і т.д.), і за рахунок цього розширюються функціональні можливості вимірювальної апаратури, що реалізує запропонований спосіб вимірювання

На фіг 1 наведена еквівалентна схема вимірювального перетворювача для вимірювання основних параметрів послідовних резонансних контурів, а на фіг 2 – структурна схема амплітудно-фазового вимірювача основних параметрів послідовних резонансних контурів

Спосіб вимірювання основних параметрів по-

слідовних резонансних контурів полягає в тому, що в послідовному колі зі зразкового опорі та досліджуваного послідовного резонансного контуру спочатку на двох частотах вимірюють значення кута фазового зсуву між напругою на зразковому опорі та напругою на досліджуваному послідовному резонансному контуру, а потім – на одній з цих частот вимірюють відношення амплітуд цих напруг

Одним з основних параметрів будь-якого резонансного контуру є його добротність, яка в свою чергу зв'язана зі смугою пропускання, характеристичним опором, опором втрат, еквівалентним резонансним опором і т.д. Як відомо, під добротністю резонансного контуру розуміють відношення характеристичного опорі  $\rho$  до опорі втрат  $r_k$ , тобто  $Q = \rho/r_k$

Для реалізації амплітудно-фазового методу вимірювання параметрів послідовних резонансних контурів необхідно забезпечити вимірювання фазового зсуву між двома електричними напругами – на деякому зразковому елементі та власне послідовному резонансному контуру, а також вимірювання відношення амплітуд цих напруг

Проаналізуємо наявність взаємозв'язку між основними параметрами послідовних резонансних контурів та фазовим зсувом і відношенням амплітуд напруг на зразковому елементі та послідовному резонансному контуру

Для вирішення поставленої задачі при вимірюванні основних параметрів послідовних резонансних контурів пропонується використовувати вимірювальний перетворювач (фіг 1), до складу якого входять зразковий резистор  $R_0$  та власне послідовний резонансний контур, де  $L$ ,  $C$  та  $r_k = r_L + r_C$  – відповідно індуктивність, ємність та активний опір послідовного резонансного контуру. Проаналізувавши еквівалентну схему вимірювального перетворювача (фіг 1), знайдемо комплексні напруги  $\dot{U}_1$  та  $\dot{U}_2$  на виході вимірювального перетворювача

$$\dot{U}_1 = \frac{\dot{U}_{вх} R_0}{R_0 + Z_k} = \frac{U_{вх} R_0}{\sqrt{(R_0 + r_k)^2 + \rho^2 \left(\frac{\omega - \omega_0}{\omega_0 \omega}\right)^2}} \times e^{j \left[ \varphi_{вх} - \arctg \frac{\rho \left(\frac{\omega - \omega_0}{\omega_0 \omega}\right)}{R_0 + r_k} \right]}, \quad (1)$$

$$\dot{U}_2 = \frac{\dot{U}_{вх} Z_k}{R_0 + Z_k} = \frac{U_{вх} r_k \sqrt{1 + Q^2 \left(\frac{\omega - \omega_0}{\omega_0 \omega}\right)^2}}{\sqrt{(R_0 + r_k)^2 + \rho^2 \left(\frac{\omega - \omega_0}{\omega_0 \omega}\right)^2}} \times e^{j \left[ \varphi_{вх} + \arctg Q \left(\frac{\omega - \omega_0}{\omega_0 \omega}\right) - \arctg \frac{\rho \left(\frac{\omega - \omega_0}{\omega_0 \omega}\right)}{R_0 + r_k} \right]}, \quad (2)$$

де  $Z_k =$

$$r_k \left[ 1 + jQ \left( \frac{\omega - \omega_0}{\omega_0 \omega} \right) \right] - \text{комплексний опір}$$

послідовного резонансного контуру,

$$\dot{U} = U_{вх} e^{j\varphi_{вх}} - \text{вхідна напруга вимірюваль-$$

ного перетворювача в комплексній формі. Фазовий зсув між комплексними напругами  $\dot{U}_2$  та  $\dot{U}_1$  дорівнює

$$\varphi = \arg\{\dot{U}_2\} - \arg\{\dot{U}_1\} = \arctg Q \left( \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right) = \arctg Q \frac{\omega^2 - \omega_0^2}{\omega_0 \omega}, \quad (3)$$

а відношення амплітуд комплексних напруг визначається співвідношенням

$$A = \frac{|\dot{U}_2|}{|\dot{U}_1|} = \frac{r_K}{R_0} \sqrt{1 + Q^2 \left( \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)^2}. \quad (4)$$

З співвідношення (3) виходить, що для знаходження добротності вимірювання необхідно проводити на двох частотах, при цьому частоти  $\omega_1$  та  $\omega_2$  повинні знаходитись поблизу резонансної частоти  $\omega_0$  для забезпечення виконання умови  $70^\circ \leq \varphi_{1(2)} \leq 70^\circ$ . Тоді

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = Q \frac{\omega_1^2 - \omega_0^2}{\omega_1 \omega_0} \quad \text{та} \quad \operatorname{tg} \varphi_2 = Q \frac{\omega_2^2 - \omega_0^2}{\omega_2 \omega_0}, \quad \text{де}$$

$\varphi_1$  та  $\varphi_2$  – відповідно результати вимірювання фазового зсуву між комплексними напругами  $\dot{U}_2$  та  $\dot{U}_1$  на частотах  $\omega_1$  та  $\omega_2$ . Вирішивши сумісно два останні рівняння, отримуємо

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{\omega_1 \omega_2 (\omega_2 \operatorname{tg} \varphi_1 - \omega_1 \operatorname{tg} \varphi_2)}{\omega_1 \operatorname{tg} \varphi_1 - \omega_2 \operatorname{tg} \varphi_2}}; \quad (5)$$

$$Q = \frac{\sqrt{\omega_1 \omega_2 (\omega_2 \operatorname{tg} \varphi_1 - \omega_1 \operatorname{tg} \varphi_2) (\omega_1 \operatorname{tg} \varphi_1 - \omega_2 \operatorname{tg} \varphi_2)}}{\omega_1^2 - \omega_2^2}. \quad (6)$$

Таким чином, для знаходження резонансної частоти  $\omega_0$  та добротності  $Q$  послідовного резонансного контуру необхідно виміряти значення частот  $\omega_1$  та  $\omega_2$ , що знаходяться поблизу резонансної частоти  $\omega_0$ , а також значення фазового зсуву між напругами  $\dot{U}_2$  та  $\dot{U}_1$  на цих частотах.

Для того, щоб виміряти такі параметри послі-

довного резонансного контуру, як характеристичний опір, індуктивність, ємність і т.д., необхідно провести вимірювання відношення амплітуд комплексних напруг  $\dot{U}_2$  та  $\dot{U}_1$ . Розглянемо результат вимірювання відношення амплітуд комплексних напруг на частоті  $\omega_1$ , який буде дорівнювати

$$A_1 = \frac{r_K}{R_0} \sqrt{1 + Q^2 \left( \frac{\omega_1}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega_1} \right)^2} = \frac{r_K}{R_0} \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_1} = \frac{r_K}{R_0} \operatorname{sec} \varphi_1 = \frac{r_K}{R_0 \cos \varphi_1}. \quad (7)$$

Використовуючи останнє співвідношення, знайдемо активний опір  $r_K$ , характеристичний опір  $\rho$ , еквівалентний резонансний опір  $R_{EP}$ , індуктив-

ність  $L$ , ємність  $C$ , коефіцієнт загасання  $\alpha$  та смугу пропускання  $2\Delta\omega$  послідовного резонансного контуру

$$r_K = A_1 R_0 \cos \varphi_1; \quad (8)$$

$$\rho = r_K Q = \frac{A_1 R_0 \cos \varphi_1 \sqrt{\omega_1 \omega_2 (\omega_2 \operatorname{tg} \varphi_1 - \omega_1 \operatorname{tg} \varphi_2) (\omega_1 \operatorname{tg} \varphi_1 - \omega_2 \operatorname{tg} \varphi_2)}}{\omega_1^2 - \omega_2^2}; \quad (9)$$

$$R_{EP} = r_K = A_1 R_0 \cos \varphi_1; \quad (10)$$

$$L = \frac{\rho}{\omega_0} = \frac{A_1 R_0 (\omega_1 \operatorname{tg} \varphi_1 - \omega_2 \operatorname{tg} \varphi_2) \cos \varphi_1}{\omega_1^2 - \omega_2^2}; \quad (11)$$

$$C = \frac{1}{\omega_0 \rho} = \frac{\omega_1^2 - \omega_2^2}{A_1 R_0 \omega_1 \omega_2 (\omega_2 \operatorname{tg} \varphi_1 - \omega_1 \operatorname{tg} \varphi_2) \cos \varphi_1}; \quad (12)$$

$$\alpha = \frac{r_K}{2L} = \frac{\omega_0}{2Q} = \frac{\omega_1^2 - \omega_2^2}{2(\omega_1 \operatorname{tg} \varphi_1 - \omega_2 \operatorname{tg} \varphi_2)}; \quad (13)$$

$$2\Delta\omega = \frac{\omega_0}{Q} = 2\alpha = \frac{\omega_1^2 - \omega_2^2}{\omega_1 \operatorname{tg} \varphi_1 - \omega_2 \operatorname{tg} \varphi_2}. \quad (14)$$

Таким чином, знайти основні параметри послідовного резонансного контуру можна, виміривши фазові зсуви  $\varphi_1$  та  $\varphi_2$  між комплексними напругами  $\dot{U}_2$  та  $\dot{U}_1$  на частотах  $\omega_1$  та  $\omega_2$  та значення цих частот (при цьому значення фазових зсувів на цих частотах за модулем не повинні бути більшими  $70^\circ$ ), а також відношення амплітуд комплексних напруг на частоті, наприклад,  $\omega_1$  та  $\omega_2$ , тобто  $A_1$ .

Аналізуючи співвідношення, за якими визначаються основні параметри послідовних резонансних контурів за допомогою еквівалентної схеми вимірювального перетворювача (фіг 1), можна зробити висновок, що точність таких вимірювань залежить від чотирьох факторів точності зразкового резистора (прецизійного еталонного активного опору)  $R_0$ , точності задавання або вимірювання циклічної частоти генератора вхідного сигналу, точності вимірювання фазового зсуву між вихідними сигналами вимірювального перетворювача, а також точності вимірювання відношення амплітуд вихідних сигналів вимірювального перетворювача.

На сучасній прецизійній елементній базі забезпечення необхідної точності опору  $R_0$  є можливим, тому що існують прецизійні резистори,

точність яких складає 0.01% та вище. Тому деяка неточність прецизійного еталонного активного опору  $R_0$  фактично не призводить до виникнення помилок при вимірюванні основних параметрів послідовних резонансних контурів.

Інший параметр, який впливає на точність вимірювання основних параметрів послідовних резонансних контурів – циклічна частота  $\omega$  вхідної напруги вимірювального перетворювача. Враховуючи, що  $\omega = 2\pi f$ , частоту  $f$  можна виміряти, перетворивши її у часовий інтервал, вимірювання якого здійснюється з досить високою точністю (для сучасних частотомірів відносна похибка вимірювання не перевищує 0.005%). Отже, точність в даному випадку теж забезпечується.

Основною проблемою, з точки зору забезпечення точності вимірювання основних параметрів послідовних резонансних контурів, є забезпечення точності вимірювання фазового зсуву між вихідними сигналами вимірювального перетворювача та відношення амплітуд цих сигналів.

Проаналізуємо точність вимірювання резонансної частоти та смуги пропускання за співвідношеннями (5) та (14). Для цих випадків середньоквадратичні відносні похибки вимірювання визначаються такими співвідношеннями

$$\delta_{\omega_0} = \frac{\sqrt{\left(\frac{\partial \omega_0}{\partial \varphi_1} \sigma_\varphi\right)^2 + \left(\frac{\partial \omega_0}{\partial \varphi_2} \sigma_\varphi\right)^2}}{\omega_0} = \frac{(\omega_1^2 - \omega_2^2) \sqrt{\sin^2 2\varphi_1 + \sin^2 2\varphi_2}}{2(\omega_1 \operatorname{tg} \varphi_1 - \omega_2 \operatorname{tg} \varphi_2)(\omega_2 \operatorname{tg} \varphi_1 - \omega_1 \operatorname{tg} \varphi_2) \cos^2 \varphi_1 \cos^2 \varphi_2} \sigma_\varphi; \quad (15)$$

$$\delta_{2\Delta\omega} = \frac{\sqrt{\left(\frac{\partial 2\Delta\omega}{\partial \varphi_1} \sigma_\varphi\right)^2 + \left(\frac{\partial 2\Delta\omega}{\partial \varphi_2} \sigma_\varphi\right)^2}}{2\Delta\omega} = \frac{\sqrt{\omega_1^2 \cos^4 \varphi_2 + \omega_2^2 \cos^4 \varphi_1}}{(\omega_1 \operatorname{tg} \varphi_1 - \omega_2 \operatorname{tg} \varphi_2) \cos^2 \varphi_1 \cos^2 \varphi_2} \sigma_\varphi, \quad (16)$$

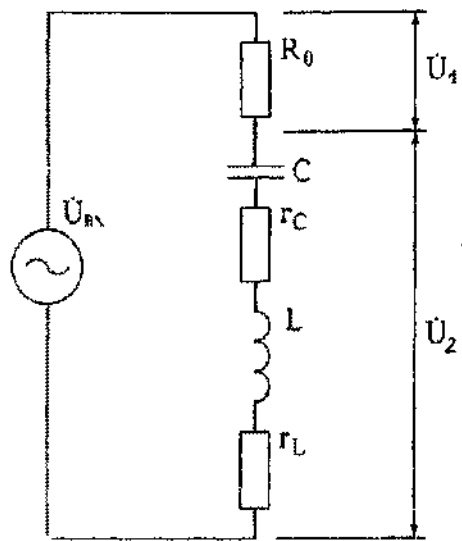
де  $\sigma_\varphi$  – середньоквадратичне відхилення відносно похибки вимірювання кута фазового зсуву електронним фазометром.

На основі розробленого вимірювального перетворювача для вимірювання основних параметрів послідовних резонансних контурів пропонується структурна схема амплітудно-фазового вимірювача основних параметрів послідовних резонансних контурів, наведена на фіг 2.

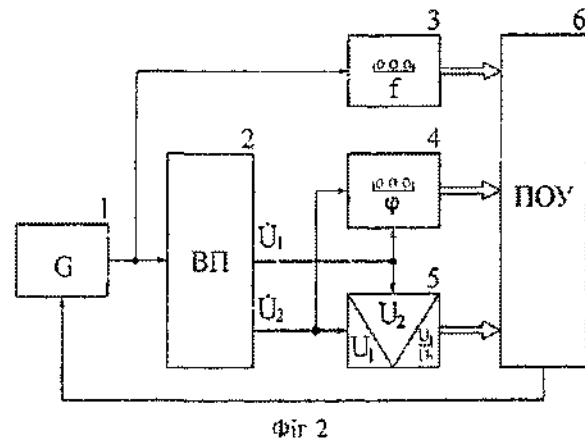
Амплітудно-фазовий вимірювач параметрів послідовних резонансних контурів складається з генератора змінної частоти 1, вимірювального перетворювача (ВП) 2 (фіг 1), цифрового частотоміра 3, цифрового фазометра 4, цифрового вимірювача відношення амплітуд 5 і пристрою обчислення та управління (ПОУ) 6.

Працює вимірювач таким чином. Генератор змінної частоти 1 виробляє гармонічний сигнал з частотою  $f_1$  (для забезпечення виконання умови  $-70^\circ \leq \varphi_{1(2)} \leq 70^\circ$ ), який потрапляє на вхід вимірювального перетворювача 2. Виходи вимірювального перетворювача підключені до входів цифрового фазометра 4 та цифрового вимірювача відно-

шення амплітуд 5, а вихід генератора змінної частоти підключений до входу цифрового частотоміра 3. Цифровий частотомір вимірює частоту  $f_1$  гармонічного сигналу генератора змінної частоти 1, цифровий фазометр – кут фазового зсуву  $\varphi_1$  між напругами  $\dot{U}_2$  та  $\dot{U}_1$ , а цифровий вимірювач відношення амплітуд-відношення амплітуд цих напруг  $A_1$ . Після цього відбувається переналаштування генератора змінної частоти 1 (за сигналом від ПОУ 6) і на частоті  $f_2$  цифровий фазометр 4 вимірює кут фазового зсуву  $\varphi_2$  між напругами  $\dot{U}_2$  та  $\dot{U}_1$ , а цифровий частотомір 3 – частоту  $f_2$  гармонічного сигналу генератора змінної частоти 1. Результат вимірювання відношення амплітуд разом з результатами вимірювання частоти та кута фазового зсуву потрапляють на ПОУ 6, де і відбувається обчислення результатів вимірювання основних параметрів послідовних резонансних контурів за співвідношеннями (5), (6) та (8)-(14). У випадку невиконання умови  $-70^\circ \leq \varphi_{1(2)} \leq 70^\circ$  ПОУ 6 переналаштовує генератор змінної частоти 1 для забезпечення її виконання.



Фіг. 1



Фіг. 2