



УКРАЇНА

(19) UA

(11) 57836

(13) C2

(51) 7 G01R25/00

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ  
І НАУКИ УКРАЇНИ

ДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІ

## ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА ВІНАХІД

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

1

2

(21) 2000105975

(22) 23 10 2000

(24) 15 07 2003

(46) 15 07 2003, Бюл. №7, 2003 р

(72) Рудик Андрій Вікторович

(73) ВІННИЦЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ТЕХНІЧНИЙ  
УНІВЕРСИТЕТ

(56) Рудик А В Фазовий метод вимірювання добротності резонансних контурів Тернопіль, 2000, стор 81

(57) Спосіб вимірювання основних параметрів паралельних резонансних контурів, який полягає в тому, що в послідовному колі з досліджуваного паралельного 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 паралельному резонансному контурі та зразковому опору, а значення основних параметрів паралельного резонансного контуру визначають за такими формулами

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

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

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

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

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

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

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

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

$$R_{EP} = \rho Q = \frac{A_1 R_0}{\cos \varphi_1},$$

де  $\omega_0$  - резонансна частота паралельного резонансного контуру,

$Q$  - добротність паралельного резонансного контуру,

$\rho$  - характеристичний опір паралельного резонансного контуру,

$L$  - індуктивність паралельного резонансного контуру,

$C$  - ємність паралельного резонансного контуру,

$r_K$  - опір втрат паралельного резонансного контуру,

$\alpha$  - коефіцієнт загасання паралельного резонансного контуру,

$2\Delta\omega$  - смуга пропускання паралельного резонансного контуру,

$R_{EP}$  - еквівалентний резонансний опір паралельного 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 паралельному резонансному контурі на частотах  $\omega_1$  та  $\omega_2$

відповідно,

$A_1$  - відношення амплітуд напруг на досліджуваному паралельному 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

(19) UA (11) 57836 (13) C2

резонансний опір) паралельних резонансних контурів

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

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

За прототип обраний спосіб вимірювання основних параметрів паралельних 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 паралельного резонансного контуру, на двох частотах вимірюють значення кута фазового зсуву між напругою на зразковому опорі та досліджуваному паралельному резонансному контуру, а також значення цих частот, після чого за отриманими результатами вимірювань обчислюють значення резонансної частоти та добротності паралельного резонансного контуру

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

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

Поставлена задача вирішується тим, що в способі вимірювання основних параметрів паралельних резонансних контурів, при якому в послідовному колі з досліджуваного паралельного 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 паралельному резонансному контуру та зразковому опорі, при цьому значення основних параметрів паралельного резонансного контуру визначають за такими формулами

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

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

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

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

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

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

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

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

$$R_{EP} = \rho Q = \frac{A_1 R_0}{\cos \varphi_1},$$

де  $\omega_0$  - резонансна частота паралельного резонансного контуру,

$Q$  - добротність паралельного резонансного контуру,

$\rho$  - характеристичний опір паралельного резонансного контуру,

$L$  - індуктивність паралельного резонансного контуру,

$C$  - ємність паралельного резонансного контуру,

$r_k$  - опір втрат паралельного резонансного контуру,

$\alpha$  - коефіцієнт загасання паралельного резонансного контуру,

$2\Delta\omega$  - смуга пропускання паралельного резонансного контуру,

$R_{EP}$  - еквівалентний резонансний опір паралельного резонансного контуру,

$R_0$  - опір зразкового резистора вимірювального перетворювача,

$\omega_1$  та  $\omega_2$  - частота входної напруги вимірювального перетворювача, на яких проводять вимірювання,

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

$A_1$  - відношення амплітуд напруг на досліджуваному паралельному резонансному контуру та зразковому опорі на частоті  $\omega_1$

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

На фіг 1 наведена еквівалентна схема вимірювального перетворювача для вимірювання ос-

новних параметрів паралельних резонансних контурів, а на фіг 2 - структурна схема амплітудно-фазового вимірювача основних параметрів паралельних резонансних контурів

Спосіб вимірювання основних параметрів паралельних резонансних контурів полягає в тому, що в послідовному колі зі зразкового опору та досліджуваного паралельного резонансного контуру спочатку на двох частотах вимірюють значення кута фазового зсуву між напругою на зразковому опорі та напругою на досліджуваному паралельному резонансному контурі, 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.і. Як відомо, під добротністю резонансного контуру розуміють відношення характеристичного опору  $\rho$  до опору втрат  $r_k$ , тобто  $Q = \rho / r_k$

Для реалізації амплітудно-фазового методу вимірювання параметрів паралельних резонанс-

$$U_1 = \frac{U_{\text{вх}} R_0}{R_0 + Z_k} = \frac{U_{\text{вх}} R_0 \sqrt{1 + Q^2 \left( \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)^2}}{\sqrt{(R_0 + \rho Q)^2 + R_0^2 Q^2 \left( \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)^2}} \times$$

$$j \left[ \varphi_{\text{вх}} + \arctg Q \left( \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right) - \arctg \frac{R_0 Q \left( \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)}{R_0 + \rho Q} \right]$$

$$U_2 = \frac{U_{\text{вх}} Z_k}{R_0 Z_k} = \frac{U_{\text{вх}} \rho Q}{\sqrt{(R_0 + \rho Q)^2 + R_0^2 Q^2 \left( \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)^2}} \times j \left[ \varphi_{\text{вх}} + \arctg \frac{R_0 Q \left( \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)}{R_0 + \rho Q} \right] \quad (2)$$

де  $Z_k = \frac{\rho Q}{1 + jQ \left( \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)}$  - комплексний опір пара-

лельного резонансного контуру,

$U_{\text{вх}} = U_{\text{вх}} e^{j\varphi_{\text{вх}}}$  - вхідна напруга вимірювального перетворювача в комплексній формі

Фазовий зсув між комплексними напругами  $U_1$  та  $U_2$  дорівнює

$$\varphi = \arg \{U_1\} - \arg \{U_2\} = \arctg Q \left( \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right) = \arctg Q \frac{\omega^2 - \omega_0^2}{\omega_0 \omega}, \quad (3)$$

а відношення амплітуд комплексних напруг визначається співвідношенням

$$A = \frac{|U_2|}{|U_1|} = \frac{\rho Q}{R_0 \sqrt{1 + Q^2 \left( \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)^2}} \quad (4)$$

З співвідношення (3) виходить, що для знаходження добротності вимірювання необхідно про-

них контурів необхідно забезпечити вимірювання фазового зсуву між двома електричними напругами - на деякому зразковому елементі та власне паралельному резонансному контурі, а також вимірювання відношення амплітуд цих напруг

Проаналізуємо наявність взаємозв'язку між основними параметрами паралельних резонансних контурів та фазовим зсувом і відношенням амплітуд напруг на зразковому елементі та паралельному резонансному контурі

Для вирішення поставленої задачі при вимірюванні основних параметрів паралельних резонансних контурів пропонується використовувати вимірювальний перетворювач (фіг 1), до складу якого входять зразковий резистор  $R_0$  та власне паралельний резонансний контур, де  $L$ ,  $C$  та  $r_k = r_k + r_c$  - відповідно індуктивність, ємність та активний опір паралельного резонансного контуру. Проаналізувавши еквівалентну схему вимірювального перетворювача (фіг 1), знайдемо комплексні напруги  $U_1$  та  $U_2$  на виході вимірювального перетворювача

водити на двох частотах, при цьому частоти  $\omega_1$  та  $\omega_2$  повинні знаходитись поблизу резонансної частоти  $\omega_0$  для забезпечення виконання умови -

$$70^\circ \leq \varphi_{1(2)} \leq 70^\circ \quad \text{Тоді} \quad \operatorname{tg} \varphi_1 = Q \frac{\omega_1^2 - \omega_0^2}{\omega_1 \omega_0} \quad \text{та}$$

$$\operatorname{tg} \varphi_2 = Q \frac{\omega_2^2 - \omega_0^2}{\omega_2 \omega_0}, \quad \text{де } \varphi_1 \text{ та } \varphi_2 - \text{відповідно результати вимірювання фазового зсуву між комплексними напругами } U_1 \text{ та } U_2 \text{ на частотах } \omega_1 \text{ та } \omega_2$$

Вирішивши сумісно два останні рівняння, отримаємо

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

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

Таким чином, для знаходження резонансної частоти  $\omega_0$  та добротності  $Q$  паралельного 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  $U_1$  та  $U_2$  на цих частотах

Для того, щоб виміряти такі параметри пара-

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

Використовуючи останнє співвідношення, знайдемо характеристичний опір  $\rho$ , індуктивність  $L$ , ємність  $C$ , активний опір  $r_k$ , коефіцієнт загасання

$$\rho = \frac{A_1 R_0}{Q \cos \varphi_1} = \frac{A_1 R_0 (\omega_1^2 - \omega_2^2)}{\cos \varphi_1 \sqrt{\omega_1 \omega_2 (\omega_2 \operatorname{tg} \varphi_1 - \omega_1 \operatorname{tg} \varphi_2) (\omega_1 \operatorname{tg} \varphi_1 - \omega_2 \operatorname{tg} \varphi_2)}}, \quad (8)$$

$$L = \frac{\rho}{\omega_0} = \frac{A_1 R_0 (\omega_1^2 - \omega_2^2)}{\omega_1 \omega_2 (\omega_2 \operatorname{tg} \varphi_1 - \omega_1 \operatorname{tg} \varphi_2) \cos \varphi_1}, \quad (9) \quad C = \frac{1}{\omega_0 \rho} = \frac{(\omega_1 \operatorname{tg} \varphi_1 - \omega_2 \operatorname{tg} \varphi_2) \cos \varphi_1}{A_1 R_0 (\omega_1^2 - \omega_2^2)}, \quad (10)$$

$$r_k = \frac{\rho}{Q} = \frac{A_1 R_0}{Q^2 \cos \varphi_1} = \frac{A_1 R_0 (\omega_1^2 - \omega_2^2)}{\omega_1 \omega_2 (\omega_2 \operatorname{tg} \varphi_1 - \omega_1 \operatorname{tg} \varphi_2) (\omega_1 \operatorname{tg} \varphi_1 - \omega_2 \operatorname{tg} \varphi_2) \cos \varphi_1}, \quad (11)$$

$$\alpha = \frac{r_k}{2L} = \frac{\omega_0}{2Q} = \frac{\omega_1^2 - \omega_2^2}{2(\omega_1 \operatorname{tg} \varphi_1 - \omega_2 \operatorname{tg} \varphi_2)}, \quad (12) \quad R_{EP} = \rho Q = \frac{A_1 R_0}{\cos \varphi_1} \quad (14)$$

$$2\Delta\omega = \frac{\omega_0}{Q} = 2\alpha = \frac{\omega_1^2 - \omega_2^2}{\omega_1 \operatorname{tg} \varphi_1 - \omega_2 \operatorname{tg} \varphi_2}, \quad (13)$$

Таким чином, знайти основні параметри паралельного резонансного контуру можна, вимірявши фазові зсуви  $\varphi_1$  та  $\varphi_2$  між комплексними напругами  $U_1$  та  $U_2$  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,  $\omega_1$ , тобто  $A_1$

Аналізуючи співвідношення, за якими визначаються основні параметри паралельних 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

пелльного резонансного контуру, як характеристичний опір, індуктивність, ємність і т.д., необхідно провести вимірювання відношення амплітуд комплексних напруг  $U_1$  та  $U_2$ . Розглянемо результат вимірювання відношення амплітуд комплексних напруг на частоті  $\omega_1$ , який буде дорівнювати

а, смугу пропускання  $2\Delta\omega$  та еквівалентний резонансний опір  $R_{EP}$  паралельного резонансного контуру

опору  $R_0$  фактично не призводить до виникнення помилок при вимірюванні основних параметрів паралельних резонансних контурів

Інший параметр, який впливає на точність вимірювання основних параметрів паралельних 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 паралельних 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 (13). Для цих випадків середньоквадратичні відносні похибки вимірювання визначаються такими співвідношеннями

$$\delta_{\omega\omega} = \frac{\sqrt{\left(\frac{\partial\omega_0}{\partial\varphi_1}\sigma_\varphi\right)^2 + \left(\frac{\partial\omega_0}{\partial\varphi_2}\sigma_\varphi\right)^2}}{\omega_0} = \quad (15)$$

$$= \frac{(\omega_1^2 - \omega_2^2)\sqrt{\sin^2 2\varphi_1 + \sin^2 2\varphi_2}}{2(\omega_1 \operatorname{tg}\varphi_1 - \omega_2 \operatorname{tg}\varphi_2)(\omega_2 \operatorname{tg}\varphi_1 - \omega_1 \operatorname{tg}\varphi_2) \cos^2 \varphi_1 \cos^2 \varphi_2} \sigma_\varphi$$

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

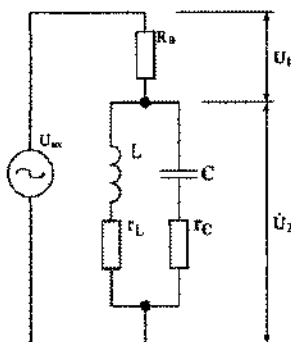
де  $\sigma_\varphi$  - середньоквадратичне відхилення відносно похибки вимірювання кута фазового зсуву електронним фазометром

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

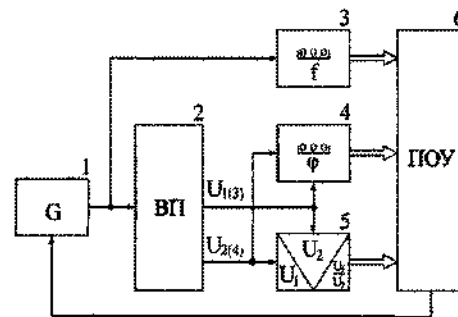
Амплітудно-фазовий вимірювач параметрів резонансних контурів складається з генератора змінної частоти 1, вимірювального перетворювача (ВП) 2 (фіг 1), цифрового частотоміра 3, цифрового фазометра 4, цифрового вимірювача відношення амплітуд 5 і пристрою обчислення та управління (ПОУ) 6

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 відношен-

ня 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  $U_1$  та  $U_2$ , а цифровий вимірювач відношення амплітуд - відношення амплітуд цих напруг  $A_1$  Після цього відбувається перенапаштування 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  $U_1$  та  $U_2$ , 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 паралельних резонансних контурів за співвідношеннями (5), (6) та (8) - (14) У випадку невиконання умови  $-70^\circ \leq \varphi_{1(2)} \leq 70^\circ$  ПОУ 6 перенапаштовує генератор змінної частоти 1 для забезпечення її виконання



Фіг. 1



Фіг. 2