

А.В. Рудик, к.т.н.
²О.О. Семенова, к.т.н.
²А.О. Семенов, к.т.н.

АМПЛІТУДНО – ФАЗОВИЙ МЕТОД ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ РЕЗОНАНСНИХ КОНТУРІВ

¹Національний університет водного господарства та природокористування, andrey05011971@mail.ru

²Вінницький національний технічний університет, semenov79@ukr.net

В статті показано, що основні параметри резонансних контурів (паралельних та послідовних) можна визначити при вимірюванні кута фазового зсуву між двома напругами на виході вимірювального перетворювача та відношення амплітуд цих напруг. Проаналізовано залежність похибок вимірювання деяких параметрів резонансних контурів (резонансної частоти та смуги пропускання) від параметрів вимірювального перетворювача. На основі запропонованих вимірювальних перетворювачів розроблено структурну схему амплітудно-фазового вимірювача основних параметрів паралельних та послідовних резонансних контурів.

Ключові слова: послідовний та паралельний резонансний контури, амплітудно-фазовий метод вимірювання, комплексний опір, кут фазового зсуву.

Вступ. При вимірюванні основних параметрів резонансних контурів (послідовних та паралельних), таких як резонансна частота, добротність, характеристичний опір, смуга пропускання і т.і., виникають труднощі. Проведений аналіз методів вимірювання основних параметрів резонансних контурів (наприклад, за величиною добротності) показав, що існуючі методи (резонансні, мостові і т.і.) володіють значною похибкою і не дозволяють в достатній мірі автоматизувати процес вимірювання. Тому постає задача розробки нових вимірювачів параметрів резонансних контурів [1].

Метою статті є розробка амплітудно-фазового методу вимірювання основних параметрів резонансних контурів (послідовних та паралельних), а також його схемна реалізація.

Постановка задачі

В статті необхідно:

- 1) показати, що основні параметри резонансних контурів (паралельних та послідовних) визначаються за результатами вимірювання кута фазового зсуву між двома напругами на виході вимірювального перетворювача та відношення амплітуд цих напруг;
- 2) проаналізувати залежність похибок вимірювання деяких параметрів резонансних контурів від параметрів вимірювального перетворювача;
- 3) на основі запропонованих вимірювальних перетворювачів розробити структурну схему амплітудно-фазового вимірювача параметрів резонансних контурів.

Розв'язок задачі. 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 ρ до опору втрат r_K , тобто $Q = \frac{\rho}{r_K}$.

Для реалізації амплітудно-фазового методу вимірювання параметрів резонансних контурів необхідно забезпечити вимірювання фазового зсуву між двома електричними напругами – на деякому зразковому елементі та власне резонансному контурі, а також вимірювання відношення амплітуд цих напруг [2]. Проаналізуємо наявність взаємозв'язку між основними параметрами резонансних контурів та фазовим зсувом і відношенням амплітуд напруг на зразковому елементі та резонансному контурі. Розглянемо окремо вимірювання основних параметрів послідовних та паралельних резонансних контурів.

Для розв'язання поставленої задачі при вимірюванні основних параметрів паралельних резонансних контурів пропонується використовувати вимірювальний перетворювач (рис.1, а), до складу якого входять зразковий резистор R_0 та власне паралельний резонансний контур, де L , C та $r_K = r_L + r_C$ – відповідно індуктивність, ємність та активний опір резонансного контуру. Проаналізувавши еквівалентну

схему вимірювального перетворювача (рис.1, а), знайдемо комплексні напруги \dot{U}_1 та \dot{U}_2 :

$$\dot{U}_1 = \frac{\dot{U}_{ex} R_0}{R_0 + \dot{Z}_{K1}} = \frac{U_{ex} R_0 \sqrt{1 + Q^2 \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)^2}}{\sqrt{(R_0 + \rho Q)^2 + R_0^2 Q^2 \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)^2}} \times \quad (1)$$

$$\times e^{j \left\{ \varphi_{ex} + \arctg Q \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right) - \arctg \frac{R_0 Q \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)}{R_0 + \rho Q} \right\}};$$

$$\dot{U}_2 = \frac{\dot{U}_{ex} \dot{Z}_{K1}}{R_0 + \dot{Z}_{K1}} = \frac{U_{ex} \rho Q}{\sqrt{(R_0 + \rho Q)^2 + R_0^2 Q^2 \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)^2}} \times e^{j \left\{ \varphi_{ex} - \arctg \frac{R_0 Q \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)}{R_0 + \rho Q} \right\}}, \quad (2)$$

де $\dot{Z}_{K1} = \frac{\rho Q}{1 + j Q \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)}$ – комплексний опір паралельного резонансного контуру;

$\dot{U}_{ex} = U_{ex} e^{j \varphi_{ex}}$ – вхідна напруга вимірювального перетворювача в комплексній формі.

Фазовий зсув між комплексними напругами \dot{U}_1 та \dot{U}_2 дорівнює [2]

$$\varphi_1 = \arg\{\dot{U}_1\} - \arg\{\dot{U}_2\} = \arctg Q \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right) = \arctg Q \frac{\omega^2 - \omega_0^2}{\omega_0 \omega}, \quad (3)$$

а відношення амплітуд комплексних напруг визначається співвідношенням

$$A_1 = \frac{|\dot{U}_2|}{|\dot{U}_1|} = \frac{\rho Q}{R_0 \sqrt{1 + Q^2 \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)^2}}. \quad (4)$$

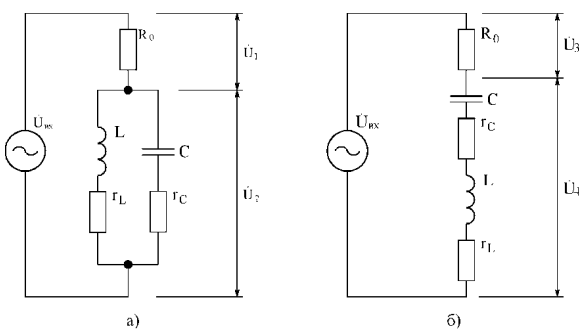


Рис.1. Еквівалентні схеми вимірювальних перетворювачів для вимірювання основних параметрів паралельних (а) та послідовних (б) резонансних контурів

З співвідношення (3) виходить, що для знаходження добротності вимірювання необхідно проводити на двох частотах, при цьому частоти ω_1 та ω_2 повинні знаходитись поблизу резонансної частоти ω_0 для забезпечення виконання умови $-70^\circ \leq \varphi_{1.1(1.2)} \leq 70^\circ$. Тоді $\operatorname{tg} \varphi_{1.1} = Q \frac{\omega_1^2 - \omega_0^2}{\omega_1 \omega_0}$ та $\operatorname{tg} \varphi_{1.2} = Q \frac{\omega_2^2 - \omega_0^2}{\omega_2 \omega_0}$, де $\varphi_{1.1}$ та $\varphi_{1.2}$ – відповідно результати вимірювання фазового зсуву між комплексними напругами \dot{U}_1 та \dot{U}_2 на частотах ω_1 та ω_2 . Розв'язавши сумісно два останні рівняння, отримаємо [3]:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{\omega_1 \omega_2 (\omega_2 \operatorname{tg} \varphi_{1.1} - \omega_1 \operatorname{tg} \varphi_{1.2})}{\omega_1 \operatorname{tg} \varphi_{1.1} - \omega_2 \operatorname{tg} \varphi_{1.2}}}; \quad (5)$$

$$Q = \frac{\sqrt{\omega_1 \omega_2 (\omega_2 \operatorname{tg} \varphi_{1.1} - \omega_1 \operatorname{tg} \varphi_{1.2}) (\omega_1 \operatorname{tg} \varphi_{1.1} - \omega_2 \operatorname{tg} \varphi_{1.2})}}{\omega_1^2 - \omega_2^2}. \quad (6)$$

Таким чином, для знаходження резонансної частоти ω_0 та добротності Q паралельного резонансного контуру необхідно виміряти значення частот ω_1 та ω_2 , що знаходяться поблизу резонансної частоти ω_0 , а також значення фазового зсуву між напругами \dot{U}_1 та \dot{U}_2 на цих частотах.

Для того, щоб виміряти такі параметри паралельного резонансного контуру, як характеристичний опір, індуктивність, ємність і т.і., необхідно провести вимірювання відношення амплітуд комплексних напруг \dot{U}_1 та \dot{U}_2 . Розглянемо результат вимірювання відношення амплітуд комплексних напруг на частоті ω_1 , який буде дорівнювати:

$$A_{1.1} = \frac{\rho Q}{R_0 \sqrt{1 + Q^2 \left(\frac{\omega_1}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega_1} \right)^2}} = \frac{\rho Q}{R_0 \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_{1.1}}} = \frac{\rho Q}{R_0 \sec \varphi_{1.1}} = \frac{\rho Q \cos \varphi_{1.1}}{R_0}. \quad (7)$$

Використовуючи останнє співвідношення, знайдемо характеристичний опір ρ , індуктивність L , ємність C , активний опір r_K , коефіцієнт згасання α , смугу пропускання $2\Delta\omega$ та еквівалентний резонансний опір R_{EP} паралельного резонансного контуру [4]:

$$\rho = \frac{A_{1.1} R_0}{Q \cos \varphi_{1.1}} = \frac{A_{1.1} R_0 (\omega_1^2 - \omega_2^2)}{\cos \varphi_{1.1} \sqrt{\omega_1 \omega_2 (\omega_2 \operatorname{tg} \varphi_{1.1} - \omega_1 \operatorname{tg} \varphi_{1.2}) (\omega_1 \operatorname{tg} \varphi_{1.1} - \omega_2 \operatorname{tg} \varphi_{1.2})}}; \quad (8)$$

$$L = \frac{\rho}{\omega_0} = \frac{A_{1.1} R_0 (\omega_1^2 - \omega_2^2)}{\omega_1 \omega_2 (\omega_2 \operatorname{tg} \varphi_{1.1} - \omega_1 \operatorname{tg} \varphi_{1.2}) \cos \varphi_{1.1}}; \quad (9)$$

$$C = \frac{1}{\omega_0 \rho} = \frac{(\omega_1 \operatorname{tg} \varphi_{1.1} - \omega_2 \operatorname{tg} \varphi_{1.2}) \cos \varphi_{1.1}}{A_{1.1} R_0 (\omega_1^2 - \omega_2^2)}; \quad (10)$$

$$r_K = \frac{\rho}{Q} = \frac{A_{1.1} R_0}{Q^2 \cos \varphi_{1.1}} = \frac{A_{1.1} R_0 (\omega_1^2 - \omega_2^2)^2}{\omega_1 \omega_2 (\omega_2 \operatorname{tg} \varphi_{1.1} - \omega_1 \operatorname{tg} \varphi_{1.2}) (\omega_1 \operatorname{tg} \varphi_{1.1} - \omega_2 \operatorname{tg} \varphi_{1.2}) \cos \varphi_{1.1}}; \quad (11)$$

$$\alpha = \frac{r_K}{2L} = \frac{\omega_0}{2Q} = \frac{\omega_1^2 - \omega_2^2}{2(\omega_1 \operatorname{tg} \varphi_{1.1} - \omega_2 \operatorname{tg} \varphi_{1.2})}; \quad (12)$$

$$2\Delta\omega = \frac{\omega_0}{Q} = 2\alpha = \frac{\omega_1^2 - \omega_2^2}{\omega_1 \operatorname{tg} \varphi_{1.1} - \omega_2 \operatorname{tg} \varphi_{1.2}}; \quad (13)$$

$$R_{EP} = \rho Q = \frac{A_{1.1} R_0}{\cos \varphi_{1.1}}. \quad (14)$$

Таким чином, знайти основні параметри паралельного резонансного контуру можна, вимірявши фазові зсуви $\varphi_{1.1}$ та $\varphi_{1.2}$ між комплексними напругами \dot{U}_1 та \dot{U}_2 на частотах ω_1 та ω_2 і значення цих частот (при цьому значення фазових зсувів на цих частотах за модулем не мають бути більшими 70° для забезпечення достатньої точності вимірювань), та відношення амплітуд комплексних напруг на частоті, наприклад, ω_1 , тобто $A_{1.1}$.

Аналогічно розглянемо методику вимірювання основних параметрів послідовних резонансних контурів. В цьому випадку пропонується використовувати вимірювальний перетворювач (рис.1, б), до складу якого, як і в попередньому випадку, входять зразковий резистор R_0 та власне послідовний резонансний контур. Проаналізувавши еквівалентну схему вимірювального перетворювача (рис.1, б),

знайдемо комплексні напруги \dot{U}_3 та \dot{U}_4 :

$$\dot{U}_3 = \frac{\dot{U}_{ex} R_0}{R_0 + \dot{Z}_{K2}} = \frac{U_{ex} R_0}{\sqrt{(R_0 + r_K)^2 + \rho^2 \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)^2}} \times e^{j \left\{ \varphi_{ex} - \arctg \frac{\rho \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)}{R_0 + r_K} \right\}}; \quad (15)$$

$$\dot{U}_4 = \frac{\dot{U}_{ex} \dot{Z}_{K2}}{R_0 + \dot{Z}_{K2}} = \frac{U_{ex} r_K \sqrt{1 + Q^2 \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)^2}}{\sqrt{(R_0 + r_K)^2 + \rho^2 \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)^2}} \times e^{j \left\{ \varphi_{ex} + \arctg Q \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right) - \arctg \frac{\rho \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)}{R_0 + r_K} \right\}}, \quad (16)$$

де $\dot{Z}_{K2} = r_K \left[1 + jQ \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right) \right]$ – комплексний опір послідовного резонансного контуру.

Фазовий зсув між комплексними напругами \dot{U}_4 та \dot{U}_3 дорівнює

$$\varphi_2 = \arg\{\dot{U}_4\} - \arg\{\dot{U}_3\} = \arctg Q \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right) = \arctg Q \frac{\omega^2 - \omega_0^2}{\omega_0 \omega}, \quad (17)$$

а відношення амплітуд комплексних напруг визначається співвідношенням

$$A_2 = \frac{|\dot{U}_4|}{|\dot{U}_3|} = \frac{r_K}{R_0} \sqrt{1 + Q^2 \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)^2}. \quad (18)$$

Проаналізувавши співвідношення (17), можна зробити висновок, що воно повністю аналогічне співвідношенню (3), тобто резонансна частота ω_0 та добротність Q послідовного резонансного контуру визначаються такими самими співвідношеннями, що і для паралельного резонансного контуру (формули (5) та (6)). Однак у формулах (5) та (6) позначення $\varphi_{1.1}$ та $\varphi_{1.2}$ потрібно замінити на $\varphi_{2.1}$ та $\varphi_{2.2}$, де $\varphi_{2.1}$ та $\varphi_{2.2}$ – відповідно результати вимірювання фазового зсуву між комплексними напругами \dot{U}_4 та \dot{U}_3 на частотах ω_1 та ω_2 . Для того, щоб виміряти такі параметри послідовного резонансного контуру, як характеристичний опір, індуктивність, ємність і т.і., необхідно провести вимірювання відношення амплітуд комплексних напруг \dot{U}_4 та \dot{U}_3 . Розглянемо результат вимірювання відношення амплітуд комплексних напруг на частоті ω_1 , який буде дорівнювати:

$$A_{2.1} = \frac{r_K}{R_0} \sqrt{1 + Q^2 \left(\frac{\omega_1}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega_1} \right)^2} = \frac{r_K}{R_0} \sqrt{1 + tg^2 \varphi_{2.1}} = \frac{r_K}{R_0} \sec \varphi_{2.1} = \frac{r_K}{R_0 \cos \varphi_{2.1}}. \quad (19)$$

Використовуючи останнє співвідношення, знайдемо активний опір r_K , характеристичний опір ρ , еквівалентний резонансний опір R_{EP} , індуктивність L , ємність C , коефіцієнт затухання α і смугу пропускання $2\Delta\omega$ послідовного резонансного контуру [5]:

$$r_K = A_{2.1} R_0 \cos \varphi_{2.1}; \quad (20)$$

$$\rho = r_K Q = \frac{A_{2.1} R_0 \cos \varphi_{2.1} \sqrt{\omega_1 \omega_2 (\omega_2 tg \varphi_{2.1} - \omega_1 tg \varphi_{2.2}) (\omega_1 tg \varphi_{2.1} - \omega_2 tg \varphi_{2.2})}}{\omega_1^2 - \omega_2^2}; \quad (21)$$

$$R_{EP} = r_K = A_{2.1} R_0 \cos \varphi_{2.1}; \quad (22)$$

$$L = \frac{\rho}{\omega_0} = \frac{A_{2.1} R_0 (\omega_1 \operatorname{tg} \varphi_{2.1} - \omega_2 \operatorname{tg} \varphi_{2.2}) \cos \varphi_{2.1}}{\omega_1^2 - \omega_2^2}; \quad (23)$$

$$C = \frac{1}{\omega_0 \rho} = \frac{\omega_1^2 - \omega_2^2}{A_{2.1} R_0 \omega_1 \omega_2 (\omega_2 \operatorname{tg} \varphi_{2.1} - \omega_1 \operatorname{tg} \varphi_{2.2}) \cos \varphi_{2.1}}; \quad (24)$$

$$\alpha = \frac{r_K}{2L} = \frac{\omega_0}{2Q} = \frac{\omega_1^2 - \omega_2^2}{2(\omega_1 \operatorname{tg} \varphi_{2.1} - \omega_2 \operatorname{tg} \varphi_{2.2})}; \quad (25)$$

$$2\Delta\omega = \frac{\omega_0}{Q} = 2\alpha = \frac{\omega_1^2 - \omega_2^2}{\omega_1 \operatorname{tg} \varphi_{2.1} - \omega_2 \operatorname{tg} \varphi_{2.2}}. \quad (26)$$

Порівнявши співвідношення (12) і (13) та (25) і (26), можна зробити висновок, що коефіцієнт затухання та смуга пропускання для послідовних та паралельних резонансних контурів визначаються однаково. Це пояснюється тим, що послідовні та паралельні резонансні контури описуються однаковими фазо-частотними характеристиками.

Таким чином, в результаті проведеного аналізу еквівалентних схем вимірювальних перетворювачів для вимірювання основних параметрів паралельних (рис.1, а) та послідовних (рис.1, б) резонансних контурів отримано співвідношення (5), (6), (8)÷(14) та (20)÷(26), за якими можна розрахувати основні параметри таких контурів.

Аналізуючи співвідношення, за якими визначаються основні параметри паралельних та послідовних резонансних контурів за допомогою еквівалентних схем вимірювальних перетворювачів (рис.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 [6]. Тому деяка неточність прецизійного еталонного активного опору R_0 фактично не призводить до виникнення помилки при вимірюванні основних параметрів паралельних та послідовних резонансних контурів. Інший параметр, який впливає на точність вимірювання основних параметрів паралельних та послідовних резонансних контурів – циклічна частота ω 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 має величину порядку 0.05%). Отже, точність в даному випадку теж забезпечується. Основною проблемою, з точки зору забезпечення точності вимірювання основних параметрів паралельних та 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 (13). Для цих випадків середньоквадратичні відносні похибки вимірювання визначаються такими співвідношеннями:

$$\begin{aligned} \delta_{\omega_0} &= \frac{\sqrt{\left(\frac{\partial \omega_0}{\partial \varphi_1} \sigma_{\varphi}\right)^2 + \left(\frac{\partial \omega_0}{\partial \varphi_2} \sigma_{\varphi}\right)^2}}{\omega_0} = \quad (27) \\ &= \frac{(\omega_1^2 - \omega_2^2) \sqrt{\sin^2 2\varphi_1 + \sin^2 2\varphi_2}}{2(\omega_1 \operatorname{tg} \varphi_1 - \omega_2 \operatorname{tg} \varphi_2)(\omega_2 \operatorname{tg} \varphi_1 - \omega_1 \operatorname{tg} \varphi_2) \cos^2 \varphi_1 \cos^2 \varphi_2} \sigma_{\varphi}; \\ \delta_{2\Delta\omega} &= \frac{\sqrt{\left(\frac{\partial 2\Delta\omega}{\partial \varphi_1} \sigma_{\varphi}\right)^2 + \left(\frac{\partial 2\Delta\omega}{\partial \varphi_2} \sigma_{\varphi}\right)^2}}{2\Delta\omega} = \frac{\sqrt{\omega_1^2 \cos^4 \varphi_2 + \omega_2^2 \cos^4 \varphi_1}}{(\omega_1 \operatorname{tg} \varphi_1 - \omega_2 \operatorname{tg} \varphi_2) \cos^2 \varphi_1 \cos^2 \varphi_2} \sigma_{\varphi}, \quad (28) \end{aligned}$$

де σ_{φ} – середньоквадратичне відхилення відносної похибки вимірювання кута фазового зсуву

електронним фазометром.

На основі розробленого вимірювального перетворювача для вимірювання основних параметрів

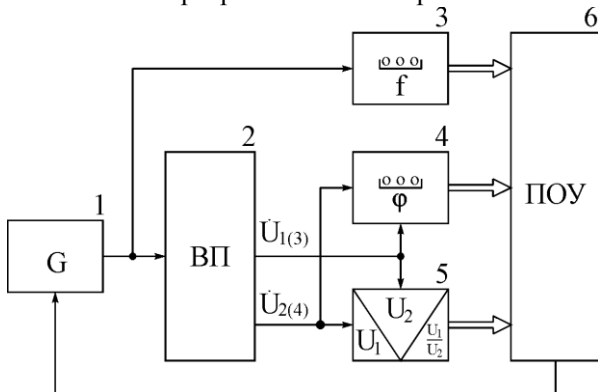


Рис.2. Структурна схема амплітудно-фазового вимірювача основних параметрів резонансних контурів

паралельних та послідовних резонансних контурів авторами пропонується структурна схема амплітудно-фазового вимірювача, наведена на рис.2. Амплітудно-фазовий вимірювач параметрів резонансних контурів складається з генератора змінної частоти 1, вимірювального перетворювача (ВП) 2 (рис.1, а або б), 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 за-

безпечення виконання умови $-70^0 \leq \varphi_1(2) \leq 70^0$),

який потрапляє на вхід вимірювального перетворювача 2. Виходи вимірювального перетворювача підключені до входів цифрового фазометра 4 та цифрового

вимірювача відношення 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 між напругами \dot{U}_1 та \dot{U}_2 (або \dot{U}_4 та \dot{U}_3) $\varphi_{1,1}$ (або $\varphi_{2,1}$), а цифровий вимірювач відношення амплітуд – відношення амплітуд цих напруг $A_{1,1}$ (або $A_{2,1}$). 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 $\varphi_{1,2}$ (або $\varphi_{2,2}$) між напругами \dot{U}_1 та \dot{U}_2 (або \dot{U}_4 та \dot{U}_3), 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 до ПОУ 6, де і відбувається обчислення результатів вимірювання основних параметрів паралельних та послідовних резонансних контурів. У випадку невиконання умови $-70^0 \leq \varphi_1(2) \leq 70^0$ ПОУ 6 переналаштовує генератор змінної частоти 1 для забезпечення її виконання.

Висновки. 1. Показано, що основні параметри резонансних контурів (паралельних та послідовних) можна визначити при вимірюванні кута фазового зсуву між двома напругами на виході вимірювального перетворювача (рис.1, а або б) та відношення амплітуд цих напруг.

2. Проаналізовано залежність похибок вимірювання резонансної частоти та смуги пропускання від параметрів вимірювального перетворювача.

3. На основі запропонованих вимірювальних перетворювачів розроблено структурну схему амплітудно-фазового вимірювача основних параметрів паралельних та послідовних резонансних контурів.

Список літературних джерел

1. Рудик А.В. Амплітудно-фазовий метод вимірювання добротності реактивних елементів// Вісник Житомирського інженерно – технологічного інституту. – №11, 1999. – С.106÷114.
2. Рудик А.В. Фазовий метод вимірювання добротності резонансних контурів//Прогресивні матеріали, технології та обладнання в машино– та приладобудуванні: Тези доповіді 4 – ої НТК. – Тернопіль. – 2000. – С. 81.
3. Рудик А.В., Павлов С.М. Резонансний метод визначення добротності варикапів// Вісник Вінницького політехнічного інституту. – №3, 2003. – С.81÷85.
4. Рудик А.В. Спосіб вимірювання основних параметрів паралельних резонансних контурів. Патент на винахід №57836 (Україна), МКІ G01R25/00. Опубліковано в бюлетені №7 від 15.07.2003.
5. Рудик А.В. Спосіб вимірювання основних параметрів послідовних резонансних контурів. Патент на винахід №57135 (Україна), МКІ G01R25/00. Опубліковано в бюлетені №6 від 16.06.2003.
6. Рудик А.В., Дрючин О.О., Семенов А.О. До визначення точності результатів вимірювань// Наука і освіта: Матеріали 8-ої міжнародної НПК. – Дніпропетровськ. – 2005. – Т.62. – С.35÷37.