

Винахід відноситься до вимірювальної техніки та може використовуватися для визначення добротності реактивних елементів (індуктивних та ємнісних) на низьких частотах, де виникають значні похибки при вимірюванні великих значень добротності.

Відомий спосіб вимірювання добротності реактивних елементів шляхом налаштування в резонанс послідовного резонансного контуру (резонансний метод) за електронним вольтметром, шкала якого проградуєвана в значеннях добротності (Кукуш В.Д. Електрорадиоизмерения. -М.: Радио и связь, 1985, - С.310).

Недоліками вказаного способу є те, що він майже не придатний для контролю параметрів реактивних елементів в діапазоні низьких частот і не дозволяє в достатній мірі автоматизувати процес вимірювання.

За прототип обраний спосіб вимірювання добротності (Куцевол М.О. Метод вимірювання добротності індуктивних елементів // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах та конверсії виробництва: Тези доповідей 3-ої науково-технічної конференції. -Хмельницький. - 1995. - С.137), який полягає в тому, що в послідовному колі, яке складається зі зразкового опору та реактивного елементу, вимірюють значення кута фазового зсуву між напругою на реактивному елементі та зразковому опорі.

Недоліком вказаного способу є те, що при проведенні вимірювань великих значень добротності в діапазоні низьких частот значно збільшується похибка вимірювань.

В основу винаходу покладена задача вдосконалення способу вимірювання добротності реактивних елементів, в якому за рахунок того, що послідовно з досліджуваним реактивним елементом додатково включають зразковий реактивний елемент (наприклад, до індуктивного - ємнісний, а до ємнісного - індуктивний), вимірюють кут фазового зсуву між напругою на послідовно з'єднаних досліджуваному реактивному елементі та зразковому реактивному елементі і напругою на зразковому опорі, додатково вимірюють відношення напруги на послідовно з'єднаних досліджуваному реактивному елементі та зразковому реактивному елементі до напруги на зразковому опорі, забезпечується зменшення похибки вимірювання, і за рахунок цього підвищується точність вимірювання добротності.

Поставлена задача вирішується тим, що в способі вимірювання добротності реактивних елементів, при якому в послідовному колі з досліджуваного реактивного елементу та зразкового опорі вимірюють значення кута фазового зсуву між напругами на цих елементах, згідно винаходу, послідовно з досліджуваним реактивним елементом включають зразковий реактивний елемент, вимірюють значення кута фазового зсуву між напругою на послідовно з'єднаних досліджуваному реактивному елементі та зразковому реактивному елементі та напругою на зразковому опорі, потім - додатково вимірюють відношення цих напруг, при цьому значення добротності реактивного елементу (відповідно індуктивного та ємнісного) визначають за такими формулами:

$$Q_L = \frac{X_L}{R_X} = \frac{A_1 R_1 \sin \varphi_1 + X_{C_0}}{A_1 R_1 \cos \varphi_1 + R_{C_0}} = \frac{N_1 A_1 \sin \varphi_1 + Q_{C_0}}{N_1 A_1 \cos \varphi_1 - 1};$$

$$Q_C = \frac{X_C}{R_X} = \frac{X_{L_0} - A_2 R_1 \sin \varphi_2}{A_2 R_2 \cos \varphi_2 - R_{L_0}} = \frac{Q_{L_0} - N_2 A_2 \sin \varphi_2}{N_2 A_2 \cos \varphi_2 - 1},$$

де  $X_L$  та  $X_C$  - індуктивний та ємнісний опори досліджуваного реактивного елементу,  $R_X$  - його активний опір;

$R_1$  - активний опір зразкового резистору;

$X_{L_0}$  та  $X_{C_0}$  - індуктивний та ємнісний опори зразкового реактивного елементу;

$R_{L_0}$  та  $R_{C_0}$  - активні опори індуктивного та ємнісного зразкового реактивного елементу;

$Q_{L_0}$  та  $Q_{C_0}$  - добротності індуктивного та ємнісного зразкових реактивного елементів;

$A_1$  та  $A_2$  - відповідно відношення напруг на послідовно з'єднаних досліджуваному та зразковому реактивному елементах (індуктивному та ємнісному або ємнісному та індуктивному) і зразковому резисторі;

$\varphi_1$  та  $\varphi_2$  - відповідно кут фазового зсуву між напругами на послідовно з'єднаних досліджуваному та зразковому реактивному елементах (індуктивному та ємнісному або ємнісному та індуктивному) і зразковому резисторі;

$N_1 = \frac{R_1}{R_{C_0}}$  та  $N_2 = \frac{R_1}{R_{L_0}}$  - відношення опору зразкового резистора  $R_1$  до активного опору зразкового ємнісного елементу  $R_{C_0}$  та активного опору зразкового індуктивного елементу  $R_{L_0}$ .

Введення у вимірювальний перетворювач послідовно з досліджуваним реактивним елементом зразкового реактивного елементу, а також введення операції вимірювання відношення напруги на послідовно з'єднаних досліджуваному реактивному елементі та зразковому реактивному елементі до напруги на зразковому опорі, призводить до зменшення похибки вимірювання, і за рахунок цього підвищується точність вимірювання добротності.

На фіг.1 наведена еквівалентна схема вимірювального перетворювача для вимірювання добротності індуктивних елементів; на фіг.2 - еквівалентна схема вимірювального перетворювача для вимірювання добротності ємнісних елементів; на фіг.3 - структурна схема пристрою для вимірювання добротності реактивних елементів, в якій реалізується запропонований спосіб вимірювання; на фіг.4 - залежності  $Q_L=f(\varphi)$  та  $\delta_{Q_L}=f(\varphi)$  для способу-прототипу; на фіг.5 - залежності  $Q_L=f(\varphi)$  та  $\delta_{Q_L}=f(\varphi)$  для запропонованого способу при різних значеннях добротності зразкового реактивного елементу  $Q_{C_0}$ ; на фіг.6 - залежності  $Q_L=f(\varphi)$  та  $\delta_{Q_L}=f(\varphi)$  для запропонованого способу при різних значеннях відношення амплітуд  $A_1$ ; на фіг.7 - залежності  $Q_L=f(\varphi)$  та  $\delta_{Q_L}=f(\varphi)$  для запропонованого способу при різних значеннях відношення активних опорів  $N_1$ ; на фіг.8 - залежність  $\delta_{Q_L}=f(Q_L)$  для способу-прототипу; на фіг.9 - залежності  $\delta_{Q_L}=f(Q_L)$  для запропонованого способу при різних значеннях добротності зразкового реактивного елементу  $Q_{C_0}$ ; на фіг.10 - залежності  $\delta_{Q_L}=f(Q_L)$  для запропонованого способу при різних значеннях відношення амплітуд  $A_1$ ; на фіг.11 - залежності  $\delta_{Q_L}=f(Q_L)$  для запропонованого способу при різних значеннях відношення активних опорів  $N_1$ .

Спосіб вимірювання добротності реактивних елементів полягає в тому, що в послідовному колі зі зразкового опору, зразкового реактивного елементу та досліджуваного реактивного елементу спочатку вимірюють значення кута фазового зсуву між напругою на послідовно з'єднаних досліджуваному реактивному елементі та зразковому реактивному елементі та напругою на зразковому опорі, а потім - вимірюють відношення цих напруг.

Як відомо, під добротністю реактивного елементу розуміють відношення реактивної енергії до активної (відповідно реактивної потужності до активної або реактивної складової повного опору до його активної складової). Крім того, відношення реактивної складової повного опору реактивного елементу до його активної складової є частиною співвідношення, яке визначає фазочастотну характеристику (ФЧХ) такого елементу або фазовий зсув вихідного сигналу відносно вхідного (для котушки індуктивності  $\varphi_L(\omega) = \frac{X_L}{R_X} = \frac{\omega L_X}{R_X}$ , для

конденсатора -  $\varphi_C(\omega) = \frac{X_C}{R_X} = \frac{1}{\omega C_X R_X}$ , де  $L_X$  та  $C_X$  - відповідно індуктивність та ємність досліджуваного реактивного елементу,  $R_X$  - його активний опір).

В ідеальних котушках індуктивності та конденсаторах фазовий зсув між напругою та струмом дорівнює  $\pm 90^\circ$ . Наявність втрат в конденсаторах та обмотках котушок індуктивності призводить до відхилення фазового зсуву, що вноситься такими елементами, від значення  $\pm 90^\circ$ . Це відхилення і є мірою якості таких елементів.

Проаналізуємо наявність взаємозв'язку між цими двома параметрами - добротністю реактивного елементу та внесеним ним фазовим зсувом.

В літературі пропонується вимірювальний перетворювач, до складу якого входять зразковий резистор з опором  $R_1$  та комплексний опір досліджуваного реактивного елементу (індуктивного  $Z_L = R_X + jX_L$  або ємнісного  $Z_C = R_X - jX_C$ ).

Проаналізувавши таку еквівалентну схему вимірювального перетворювача, знайдемо комплексні напруги на виході зразкового опору  $\dot{U}_1$  та досліджуваного реактивного елементу  $\dot{U}_2$ :

$$\dot{U}_1 = \frac{U_{вх} R_1}{R_1 + Z_L} = \frac{U_{вх} R_1}{\sqrt{(R_1 + R_X)^2 + X_L^2}} e^{j\left\{ \varphi_{вх} - \arctg \frac{X_L}{R_1 + R_X} \right\}}, \quad (1)$$

$$\dot{U}_2 = \frac{U_{вх} Z_L}{R_1 + Z_L} = \frac{U_{вх} \sqrt{R_X^2 + X_L^2}}{\sqrt{(R_1 + R_X)^2 + X_L^2}} e^{j\left\{ \varphi_{вх} - \arctg \frac{X_L}{R_X} - \arctg \frac{X_L}{R_1 + R_X} \right\}}, \quad (2)$$

де  $U_{вх} = U_{вх} e^{j\varphi_{вх}}$  - вхідна напруга вимірювального перетворювача в комплексній формі. Фазовий зсув між комплексними напругами  $U_2$  та  $U_1$  дорівнює

$$\varphi_0 = \arg\{U_2\} - \arg\{U_1\} = \arg \operatorname{tg} \frac{X_L}{R_X}. \quad (3)$$

Враховуючи, що  $Q_L = \frac{X_L}{R_X}$ , з останнього співвідношення отримуємо розрахункову форму для визначення добротності індуктивного елементу у вигляді

$$Q_L = \operatorname{tg} \varphi_0. \quad (4)$$

Як видно з співвідношення (4), для вимірювання добротності індуктивного елементу необхідно визначити значення кута фазового зсуву  $\varphi_0$ . При цьому середньоквадратичне відхилення відносної похибки вимірювання добротності буде визначатися співвідношенням

$$\delta_{Q_L} = \frac{1}{Q_L} \cdot \frac{\partial Q_L}{\partial \varphi_0} \sigma_\varphi = \frac{1}{\operatorname{tg} \varphi_0} \cdot \frac{1}{\cos^2 \varphi_0} \sigma_\varphi = \frac{2\sigma_\varphi}{\sin 2\varphi_0}, \quad (5)$$

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

За співвідношеннями (4) та (5) побудовані залежності, наведені на фіг.4 та фіг.8, аналіз яких дозволяє зробити висновок, що розглянутий спосіб непридатний для вимірювання добротності індуктивних елементів, тому що при вимірюванні великих значень добротності  $Q_L > 100$  похибка вимірювання перевищує 17.5% (при  $\sigma_\varphi = 0.1^\circ$ ). Тому необхідно розробити такі вимірювальні перетворювачі, які б дозволили значно зменшити похибку вимірювання великих значень добротності реактивних елементів при незначному ускладненні вимірювань.

В зв'язку з цим автором запропонований ще один варіант побудови вимірювального перетворювача, до складу якого входять зразковий резистор  $R_1$ , досліджуваний індуктивний елемент з комплексним опором  $Z_L = R_X + jX_L$  та зразковий ємнісний елемент з комплексним опором  $Z_{C_0} = R_{C_0} - jX_{C_0}$  (див. фіг.1).

Проаналізувавши таку еквівалентну схему вимірювального перетворювача, знайдемо комплексні напруги  $U_3$  та  $U_4$  на виході запропонованого вимірювального перетворювача:

$$\dot{U}_3 = \frac{U_{вх} R_1}{R_1 + Z_L + Z_{C_0}} = \frac{U_{вх} R_1}{\sqrt{(R_1 + R_X + R_{C_0})^2 + (X_L - X_{C_0})^2}} e^{j\left\{ \varphi_{вх} - \arctg \frac{X_L - X_{C_0}}{R_1 + R_X + R_{C_0}} \right\}}, \quad (6)$$

$$\dot{U}_4 = \frac{U_{Bx}(Z_L + Z_{Co})}{R_1 + Z_L + Z_{Co}} = \frac{U_{Bx}\sqrt{(R_X + R_{Co})^2 + (X_L - X_{Co})^2}}{\sqrt{(R_1 + R_X + R_{Co})^2 + (X_L - X_{Co})^2}} e^{j\left\{\varphi_{Bx} - \arctg \frac{X_L - X_{Co}}{R_X + R_{Co}} - \arctg \frac{X_L - X_{Co}}{R_1 + R_X + R_{Co}}\right\}}, \quad (7)$$

Для такого вимірювальною перетворювача фазовий зсув між комплексними напругами  $U_4$  та  $U_3$  визначається як

$$\varphi_1 = \arg\{U_4\} - \arg\{U_3\} = \arg \operatorname{tg} \frac{X_L - X_{Co}}{R_X + R_{Co}}, \quad (8)$$

а відношення амплітуд комплексних напруг  $U_4$  та  $U_3$  – співвідношенням

$$A_1 = \frac{|U_4|}{|U_3|} = \frac{\sqrt{(R_X + R_{Co})^2 + (X_L - X_{Co})^2}}{R_1}. \quad (9)$$

Вирішивши сумісно рівняння (8) та (9), отримаємо співвідношення для визначення складових комплексної  $U_4$  та  $U_3$  опорів котушки індуктивності, тобто  $R_X = A_1 R_1 \cos \varphi_1 - R_{Co}$  та  $X_L = A_1 R_1 \sin \varphi_1 + X_{Co}$ . Тоді добротність індуктивного елемента буде визначатися формулою

$$Q_L = \frac{X_L}{R_X} = \frac{A_1 R_1 \sin \varphi_1 + X_{Co}}{A_1 R_1 \cos \varphi_1 - R_{Co}} = \frac{N_1 A_1 \sin \varphi_1 + Q_{Co}}{N_1 A_1 \cos \varphi_1 - 1} \quad (10)$$

де  $N_1 = \frac{R_1}{R_{Co}}$  - відношення опору зразкового резистора  $R_1$  до активного опору зразкового ємнісного елемента  $R_{Co}$ ;  $Q_{Co} = \frac{X_{Co}}{R_{Co}}$  - добротність зразкового ємнісного елемента, а середньоквадратичне відхилення відносно похибки вимірювання добротності – співвідношенням

$$\delta_{QL} = \frac{\sqrt{\left(\frac{\partial Q_L}{\partial A_1} \sigma_A\right)^2 + \left(\frac{\partial Q_L}{\partial \varphi_1} \sigma_\varphi\right)^2}}{Q_L} = \frac{N_1 \sqrt{(\sin \varphi_1 + Q_{Co} \cos \varphi_1)^2 \sigma_A^2 + A_1^2 (N_1 A_1 + Q_{Co} \sin \varphi_1 - \cos \varphi_1)^2 \sigma_\varphi^2}}{(N_1 A_1 \cos \varphi_1 - 1)(N_1 A_1 \sin \varphi_1 + Q_{Co})}. \quad (11)$$

де  $\sigma_A$  - середньоквадратичне відхилення відносно похибки вимірювання відношення амплітуд двох напруг.

За співвідношеннями (10) та (11) були побудовані залежності, наведені на фіг. 5 ÷ фіг.7 та фіг.9 ÷ фіг.11 (при  $\sigma_\varphi = 0.1^\circ$  та  $\sigma_A = 2\%$ ). Аналіз цих залежностей дозволяє зробити висновки, що точність вимірювання добротності індуктивного елемента збільшується при збільшенні добротності зразкового ємнісного елемента, тобто при  $Q_L = 100$  та  $Q_{Co} = 10 \delta_{QL} = 10.18\%$ , при  $Q_L = 100$  та  $Q_{Co} = 40 \delta_{QL} = 4.46\%$ , а при  $Q_L = 100$  та  $Q_{Co} = 100 \delta_{QL} = 2.42\%$  (див. фіг.5 та фіг.9). При збільшенні відношення амплітуд на реактивному елементі та зразковому опорі точність вимірювання добротності індуктивного елемента зменшується, тобто при  $Q_L = 100$  та  $A_1 = 2 \delta_{QL} = 2.42\%$ , при  $Q_L = 100$  та  $A_1 = 5 \delta_{QL} = 3.51\%$ , а при  $Q_L = 100$  та  $A_1 = 10 \delta_{QL} = 5.83\%$  (див. фіг.6 та фіг.10). При збільшенні відношення опору зразкового резистора до активного опору зразкового ємнісного елемента точність вимірювання добротності індуктивного елемента також зменшується, тобто при

$Q_L = 100$  та  $N_1 = 5 \delta_{QL} = 2.42\%$ , при  $Q_L = 100$  та  $N_1 = 20 \delta_{QL} = 5.21\%$ , а при

$Q_L = 100$  та  $N_1 = 100 \delta_{QL} = 11.64\%$  (див. фіг.7 та фіг.11). Таким чином, як показує аналіз, при проведенні вимірювання добротності індуктивного елемента необхідно добротність зразкового ємнісного елемента вибирати якомога більшою ( $Q_{Co} \geq 100$ ), а відношення опору зразкового резистора до активного опору зразкового ємнісного елемента - порівняно невеликим ( $N_1 \approx 5 \div 10$ ) для того, щоб активний опір незначно шунтував створений послідовний резонансний контур (однак вибирати значення  $N_1 \geq 3$  не варто, тому що в цьому випадку значно збільшується похибка вимірювання малих значень добротності індуктивного елемента).

Для вимірювання добротності ємнісних елементів можна використовувати аналогічний вимірювальний перетворювач, до складу якого входять зразковий резистор  $R_1$ , досліджуваний ємнісний елемент з комплексним опором  $Z_C = R_X - jX_C$  та зразковий індуктивний елемент з комплексним опором  $Z_{Lo} = R_{Lo} + jX_{Lo}$  (див. фіг.2).

Для такої схеми вимірювального перетворювача комплексні напруги  $U_5$  та  $U_6$  будуть відповідно дорівнювати:

$$\dot{U}_5 = \frac{U_{Bx} R_1}{R_1 + Z_C + Z_{Lo}} = \frac{U_{Bx} R_1}{\sqrt{(R_1 + R_X + R_{Lo})^2 + (X_{Lo} - X_C)^2}} e^{j\left\{\varphi_{Bx} - \arctg \frac{X_{Lo} - X_C}{R_1 + R_X + R_{Lo}}\right\}}, \quad (12)$$

$$\dot{U}_6 = \frac{U_{Bx}(Z_C + Z_{Lo})}{R_1 + Z_C + Z_{Lo}} = \frac{U_{Bx}\sqrt{(R_X + R_{Lo})^2 + (X_{Lo} - X_C)^2}}{\sqrt{(R_1 + R_X + R_{Lo})^2 + (X_{Lo} - X_C)^2}} e^{j\left\{\varphi_{Bx} - \arctg \frac{X_{Lo} - X_C}{R_X + R_{Lo}} - \arctg \frac{X_{Lo} - X_C}{R_1 + R_X + R_{Lo}}\right\}}, \quad (13)$$

Фазовий зсув між напругами, що визначаються співвідношеннями (12) та (13), а також відношення їх амплітуд будуть відзначатися таким чином:

$$\varphi_2 = \arg\{U_6\} - \arg\{U_5\} = \arg \operatorname{tg} \frac{X_{L0} - X_C}{R_X + R_{L0}}, \quad (14)$$

$$A_2 = \frac{|U_6|}{|U_5|} \frac{\sqrt{(R_X + R_{L0})^2 + (X_{L0} - X_C)^2}}{R_1}. \quad (15)$$

З рівнянь (14) та (15) отримаємо співвідношення для визначення складових комплексною опорю ємнісного елементу, тобто  $R_X = A_2 R_1 \cos \varphi_2 - R_{L0}$  та  $X_C = X_{L0} - A_2 R_1 \sin \varphi_2$ . В цьому випадку добротність ємнісного елементу буде визначатися співвідношенням

$$Q_C = \frac{X_C}{R_X} = \frac{X_{L0} - A_2 R_1 \sin \varphi_2}{A_2 R_1 \cos \varphi_2 - R_{L0}} = \frac{Q_{L0} - N_2 A_2 \sin \varphi_2}{N_2 A_2 \cos \varphi_2 - 1} \quad (16)$$

де  $N_2 = \frac{R_1}{R_{L0}}$  - відношення опорю зразкового резистора  $R_1$  до активного опорю зразкового індуктивного елементу  $R_{L0}$ , а середньоквадратичне відхилення відносної похибки вимірювання добротності - співвідношенням

$$\delta_{Qc} = \frac{\sqrt{\left(\frac{\partial Q_C}{\partial A_2} \sigma_A\right)^2 + \left(\frac{\partial Q_C}{\partial \varphi_2} \sigma_\varphi\right)^2}}{Q_C} = \quad (17)$$

$$= \frac{N_2 \sqrt{(\sin \varphi_2 + Q_{L0} \cos \varphi_2)^2 \sigma_A^2 + A_2^2 (Q_{L0} \sin \varphi_2 - N_2 A_2 + \cos \varphi_2)^2 \sigma_\varphi^2}}{(N_2 A_2 \cos \varphi_2 - 1)(Q_{L0} - N_2 A_2 \sin \varphi_2)}.$$

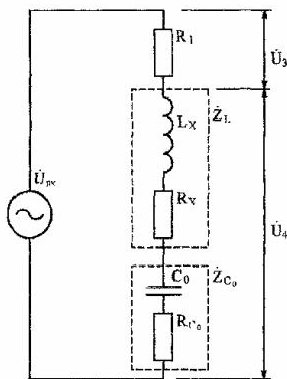
Співвідношення (10) і (16) та (11) і (17) повністю однакових умовах вимірювань  $\varphi_1 = \varphi_2$ .

Тому проводити аналіз похибок вимірювання добротності ємнісних елементів немає сенсу.

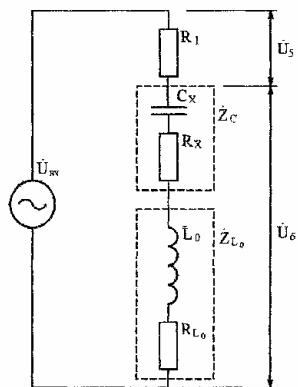
На основі розробленого вимірювального перетворювача пропонується структурна схема амплітудно-фазового куметра, наведена на фіг.3.

Амплітудно-фазовий куметр складається з генератора змінної частоти 1, вимірювального перетворювача (ВП) 2 (фіг.1 або фіг.2), цифрового фазометра 3, вимірювача відношення амплітуд 4, аналого-цифрового перетворювача (АЦП) 5 та пристрою обчислення (ПО) 6.

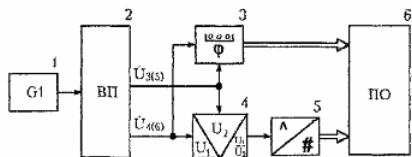
Працює вимірювач таким чином. Генератор змінної частоти і виробляє гармонічний сигнал з частотою  $f$  (для визначення добротності реактивного елементу в діапазоні частот), який потрапляє на вхід вимірювального перетворювача 2. Виходи вимірювального перетворювача підключені до входів цифрового фазометра 3 та вимірювача відношення амплітуд 4. Цифровий фазометр вимірює кут фазового зсуву між напругами  $U_4$  та  $U_3$  (або  $U_6$  та  $U_5$ )  $\varphi_1$  (або  $\varphi_2$ ), а вимірювач відношення амплітуд - відношення амплітуд цих напруг  $A_1$  (або  $A_2$ ). Результат вимірювання відношення амплітуд за допомогою АЦП 5 перетворюється в цифровий код та разом з результатом вимірювання кута фазового зсуву потрапляє на ПО 6, де і відбувається обчислення результату вимірювання добротності реактивного елементу за формулами (10) або (16).



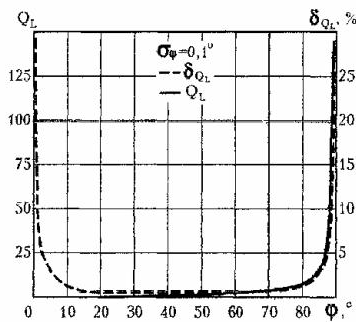
Фіг. 1



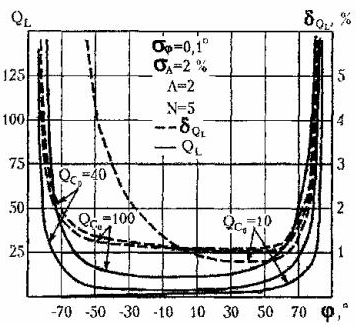
Фиг. 2



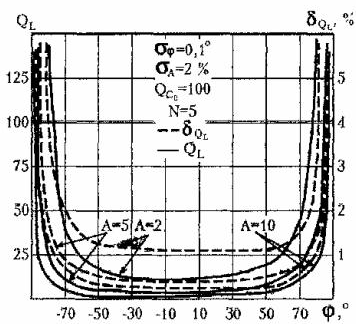
Фиг. 3



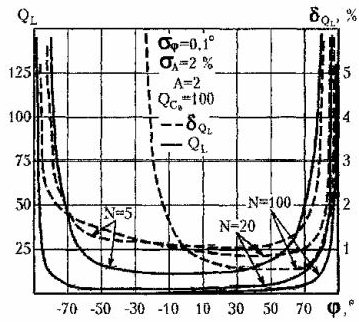
Фиг. 4



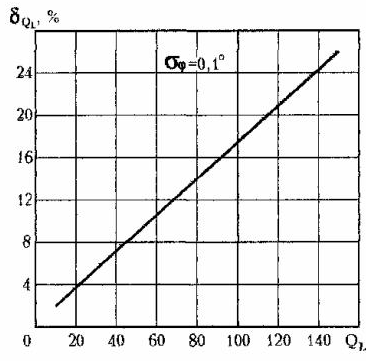
Фиг. 5



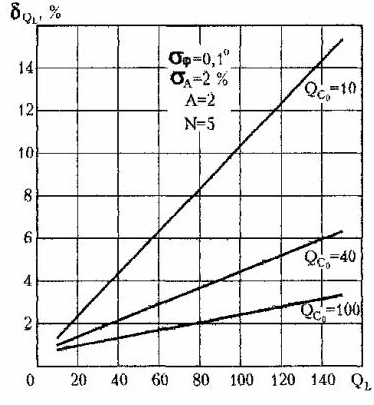
Фиг. 6



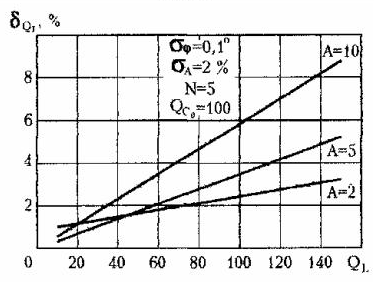
Фиг. 7



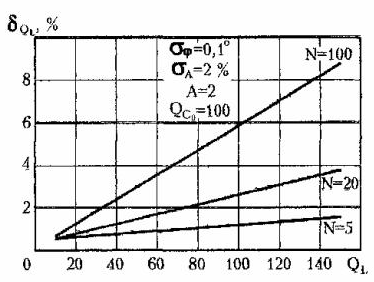
Фиг. 8



Фиг. 9



Фиг. 10



Фиг. 11