

Лекція 8
МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ
ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ ІЗ ЗОСЕРЕДЖЕНИМИ СТАЛИМИ
(продовження)

8.1 Мости змінного струму

Для вимірювання параметрів котушок індуктивностей і ємностей конденсаторів використовуються мости змінного струму. Схеми мостів змінного струму досить різноманітні. Крім чотириплечих мостів застосовують шести- і семиплечі мостові схеми, а також схеми мостів з індуктивно-зв'язаними елементами.

Схема чотириплечого мосту змінного струму наведена на рис. 8.1. Плечі такого мосту в загальному випадку складають комплексні опори: $\bar{Z}_x = R_x + jX_x$; $\bar{Z}_1 = R_1 + jX_1$; $\bar{Z}_2 = R_2 + jX_2$; $\bar{Z}_3 = R_3 + jX_3$. Міст змінного струму зрівноважений, якщо виконується умова

$$\bar{Z}_x \bar{Z}_2 = \bar{Z}_1 \bar{Z}_3. \quad (8.1)$$

Виконавши підстановку, отримаємо

$$(R_x R_2 - X_x X_2) + j(R_x X_2 + R_2 X_x) = (R_1 R_3 - X_1 X_3) + j(R_1 X_3 + R_3 X_1).$$

Оскільки два комплексні числа дорівнюють одне одному, якщо роздільно є рівними їх дійсні й уявні частини, то умова зрівноважування мосту може бути представлена у вигляді двох рівностей

$$\begin{aligned} R_x R_2 - X_x X_2 &= R_1 R_3 - X_1 X_3; \\ R_x X_2 + R_2 X_x &= R_1 X_3 + R_3 X_1. \end{aligned} \quad (8.2)$$

Рівності (8.2) свідчать, що для зрівноважування мостової схеми змінного струму необхідно мати можливість регулювати не менше двох параметрів мосту.

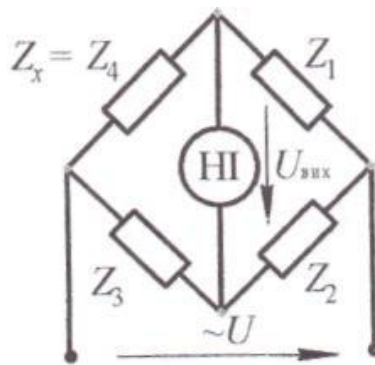


Рисунок 8.1 – Схема чотириплечого мосту змінного струму

Записавши (8.1) в показниковій формі, дістанемо

$$Z_x Z_2 e^{j(\psi_x + \psi_2)} = Z_1 Z_3 e^{j(\psi_1 + \psi_3)}. \quad (8.3)$$

Співвідношення (8.3) також розпадається на дві скалярні рівності

$$\begin{aligned}Z_x Z_2 &= Z_1 Z_3; \\ \psi_x + \psi_2 &= \psi_1 + \psi_3.\end{aligned}\tag{8.4}$$

Друге рівняння (8.4) показує, які за характером мають бути опори плечей мостової схеми, щоб забезпечити рівновагу. Якщо у двох суміжних плечах включені активні опори (наприклад $\psi_1 = 0$; $\psi_2 = 0$), то у двох інших суміжних плечах мають бути опори одного характеру, тобто або індуктивного, або ємнісного. Якщо активні опори включені в протилежні плечі (наприклад $\psi_1 = 0$; $\psi_3 = 0$), то в два інших протилежних плеча необхідно включити різні за характером опори: в одне плече – індуктивного, в інше – ємнісного характеру.

Зрівноважування мосту змінного струму в загальному випадку потребує значної витрати часу. Тому при проектуванні обирають таке розміщення і таку схему з'єднань елементів приладу, при яких забезпечується швидка збіжність мосту. Під збіжністю розуміють здатність мосту досягати стану рівноваги більшим або меншим числом регулювань параметрів його елементів.

Мости змінного струму поділяються на частотонезалежні і частотозалежні. Перші з них, якщо зрівноважені на одній частоті, залишаються зрівноваженими і при інших значеннях частоти.

Як нуль-індикатор НІ (рис. 8.1) використовують пристрій, який складається з підсилювача змінного струму, перетворювача змінного струму в постійний та магнітоелектричного мікроамперметра, або електронно-променевої трубки. Якщо, наприклад, на горизонтально відхиляючі пластини подати опорну напругу, а на вертикально відхиляючі пластини – напругу з діагоналі мосту, то на екрані трубки можна спостерігати зміну не тільки амплітуди, але й фази напруги в діагоналі мосту при регулюванні, що полегшує процес зрівноважування.

Живлення мосту змінного струму здійснюється від мережі промислової частоти через розділювальний трансформатор (трансформатор не тільки перетворює напругу мережі до значення, на яке розрахований міст, але й електрично відділяє міст від мережі).

Основна похибка мостових схем містить такі складові: похибки за рахунок відхилення значень параметрів зразкових елементів мосту від номінальних; похибка, зумовлена неточністю балансування мосту; похибки, зумовлені паразитними опором, ємністю та індуктивністю з'єднувальних провідників, перехідним опором контактів, а також паразитними зв'язками між елементами мосту.

8.1.1 Мости для вимірювання ємності

Мости змінного струму для вимірювання ємності і тангенса кута діелектричних втрат конденсаторів досить різноманітні. Як відомо, реальний конденсатор можна представити послідовною або паралельною еквівалентною схемою. Послідовна схема значною мірою відповідає випадку, коли втрати в діелектрику незначні; при великих втратах в діелектрику застосовують паралельну еквівалентну схему.

Мости змінного струму дозволяють вимірювати параметри як послідовної, так і паралельної еквівалентних схем конденсаторів. На рис. 8.2, а конденсатор, ємність якого вимірюється, зображений паралельною еквівалентною схемою з елементами C_x і R_x . В суміжне плече мосту включені паралельно резистор R_1 і конденсатор C_1 . Якщо міст зрівноважити, згідно з (8.1) матимемо

$$\frac{R_2}{\frac{1}{R_x} + j\omega C_x} = \frac{R_3}{\frac{1}{R_1} + j\omega C_1};$$

$$\frac{R_2}{R_1} + j\omega C_1 R_2 = \frac{R_3}{R_x} + j\omega C_x R_3,$$

звідки

$$C_x = C_1 \frac{R_2}{R_3}; \quad R_x = R_1 \frac{R_3}{R_2};$$

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{U/R_x}{U\omega C_x} = \frac{1}{\omega C_x R_x} = \frac{1}{\omega C_1 R_1}. \quad (8.5)$$

Міст зрівноважується змінюванням опорів R_1 і R_2 . При незмінному значенні ємності $C_1 = \text{const}$ шкалу резистора R_1 градуують в одиницях тангенса кута втрат, а шкалу R_2 – в одиницях ємності. Змінюванням опору резистора R_3 здійснюється перемикання меж вимірювання мосту.

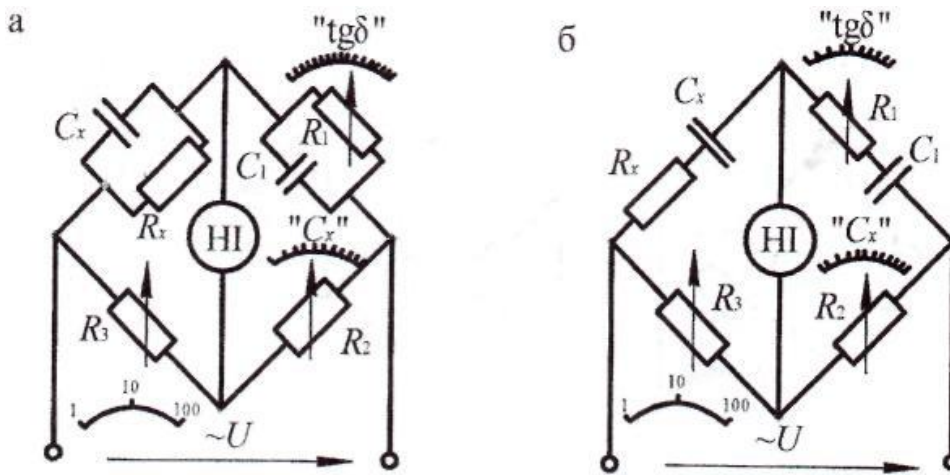


Рисунок 8.2 – Схеми мостів змінного струму для вимірювання ємності

Міст для вимірювання параметрів послідовної еквівалентної схеми конденсаторів (рис. 8.2, б) відрізняється від мосту (рис. 8.2, а) тільки тим, що в ньому зразковий резистор R_1 і конденсатор C_1 увімкнуті не паралельно, а послідовно. З умови рівноваги

$$\left(R_x + \frac{1}{j\omega C_x} \right) R_2 = \left(R_1 + \frac{1}{j\omega C_1} \right) R_3$$

маємо

$$C_x = C_1 \frac{R_2}{R_3}; \quad R_x = R_1 \frac{R_3}{R_2}; \quad \operatorname{tg} \delta = \omega C_x R_x = \omega C_1 R_1. \quad (8.6)$$

І в цьому випадку вимірювана ємність пропорційна опорі резистора R_2 , а $\operatorname{tg} \delta$ – опорі резистора R_1 . Мости, що випускаються промисловістю, мають перемикач, за допомогою якого вибирається еквівалентна схема (рис. 8.2, а або б).

Процес зрівноважування мостів (рис. 8.2) відбувається так. Змінюючи опір резистора R_1 , досягають мінімальних показань нуль-індикатора. Після цього змінюють опір резистора R_2 і досягають подальшого зменшення показань нуль-індикатора. Знову змінюють опір резистора R_1 , а потім – опір резистора R_2 , кожного разу досягаючи зменшення показань нуль-індикатора. Цей процес повторюють доти, доки напруга між точками А і В мосту не досягне нульового значення, тобто міст буде повністю зрівноважений.

Зрівноважування мостів змінного струму не завжди досягається швидко та легко. Залежно від схеми та параметрів мосту для його зрівноважування необхідна різна кількість операцій регулювання. Ця властивість називається збіжністю мостової схеми.

8.1.2 Мости для вимірювання індуктивностей

У мостових схемах для вимірювання індуктивностей у плечі порівняння найчастіше використовуються зразкові конденсатор C_2 і резистор R_2 , з'єднані паралельно (рис. 8.3). Котушка, індуктивність якої вимірюється, представлена на рис. 8.3 послідовною еквівалентною схемою з параметрами L_x і R_x .

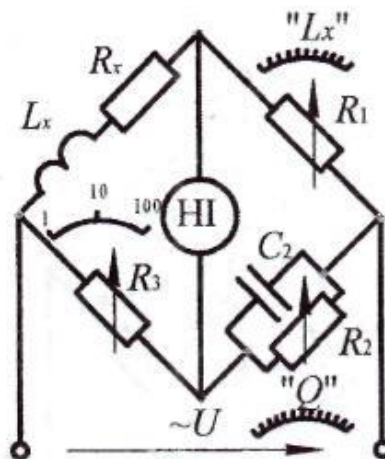


Рисунок 8.3 – Схеми мостів змінного струму для вимірювання індуктивності

Рівняння рівноваги для схеми (рис. 8.3) має вигляд

$$\frac{R_x + j\omega L_x}{\frac{1}{R_2} + j\omega C_2} = R_1 R_3$$

або

$$R_x + j\omega L_x = \frac{R_1 R_3}{R_2} + j\omega C_2 R_1 R_3.$$

Звідси

$$L_x = C_2 R_1 R_3; \quad R_x = \frac{R_1 R_3}{R_2}.$$

Добротність котушки індуктивності визначається виразом

$$Q = \frac{\omega L_x}{R_x} = \omega C_2 R_2.$$

При незмінних значеннях C_2 , R_3 міст урівноважується зміною опорів резисторів R_1 і R_2 . Резистор R_1 градаують в одиницях індуктивності, а резистор R_2 – в значеннях добротності. В практичних схемах дискретною зміною опорів R_3 розширюються межі вимірювань в 10, 100 і більше разів. Недоліком мосту є погана збіжність при малих значеннях добротності (при $Q < 1$).

8.1.3 Трансформаторні мостові схеми

Розглянуті вище мости змінного струму застосовуються на невисоких частотах (50, 100, 1000 Гц). На більш високих частотах зростає вплив паразитних індуктивних і ємнісних параметрів резисторів, з'єднувальних провідників, ємності монтажу, що призводить до зниження точності результатів вимірювання. Похибки можна суттєво зменшити, якщо замість резисторів, які розміщені в суміжних плечах відношення, наприклад в схемах рис. 8.2, використати обмотки трансформатора з тісним індуктивним зв'язком. Індуктивний зв'язок між обмотками L_1 і L_2 , який характеризується взаємною індуктивністю M і коефіцієнтом зв'язку $K = M / \sqrt{L_1 L_2}$, називається тісним, якщо значення K мало відрізняється від одиниці, тобто виконується умова $M \approx \sqrt{L_1 L_2}$. Тісний індуктивний зв'язок забезпечується намотуванням обмоток на один сердечник з матеріалу великої магнітної проникності. Такі обмотки використовуються в мостових схемах як плечові елементи у вигляді спеціальних трансформаторів, що і обумовило назву трансформаторних мостів.

На рис. 8. 4 наведена схема найпростішого трансформаторного мосту. Два плеча мосту складають однакові вторинні обмотки трансформатора напруги ТН, у два других плеча включаються зразковий $\bar{Z}_{зр}$ і вимірюваний \bar{Z}_x опори. Трансформатор ТН формує напруги U_1 і U_2 , які діють на елементи $\bar{Z}_{зр}$ і \bar{Z}_x .

Сила струму в діагоналі нуль-індикатора

$$\dot{I} = \dot{I}_1 - \dot{I}_2.$$

У зрівноваженому стані ця сила струму дорівнює нулю, тому

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_2.$$

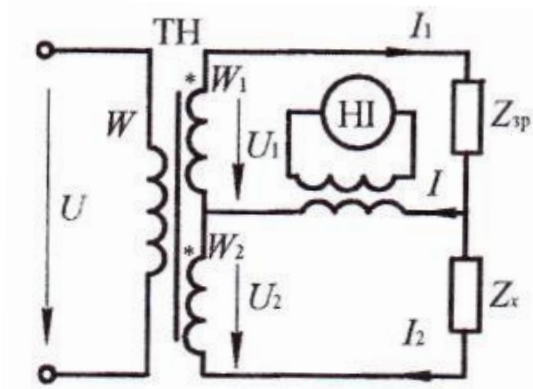


Рисунок 8.4 – Схема найпростішого трансформаторного мосту

Враховуючи, що

$$i_1 = \frac{\dot{U}_1}{\bar{Z}_{zp}} = \frac{\dot{U}W_1}{\bar{Z}_{zp}W};$$

$$i_2 = \frac{\dot{U}_2}{\bar{Z}_x} = \frac{\dot{U}W_2}{\bar{Z}_xW},$$

де W , W_1 , W_2 – кількість витків первинної і вторинних обмоток трансформатора; знайдемо

$$\frac{\dot{U}W_1}{\bar{Z}_{zp}W} = \frac{\dot{U}W_2}{\bar{Z}_xW},$$

звідки маємо

$$\bar{Z}_x = \bar{Z}_{zp} \frac{W_2}{W_1}. \quad (8.7)$$

Таким чином, умова рівноваги мостів з тісним індуктивним зв'язком плечей відрізняється від умови рівноваги чотириплечих мостів (рисунки 8.2, 8.3) тим, що в ній множником, який пов'язує значення вимірюваного і зразкового опорів, є не відношення опорів, які залежать від частоти, температури, часу, а стабільне відношення кількостей витків обмоток. Міст може бути зрівноважений зміною відношення кількостей витків W_2/W_1 і регулюванням хоча б одного параметра зразкового опору.

8.2 Резонансний метод

Резонансний метод вимірювання параметрів електричних кіл базується на реалізації відомої залежності власної частоти коливального контуру від значень його параметрів

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}.$$

Знаючи резонансну частоту контуру f_p і один його параметр (L або C), можна визначити інший параметр. Резонансний метод застосовується для вимірювання індуктивності, ємності, добротності котушок індуктивностей і коливальних контурів в діапазоні частот від десятків кілогерц до 3000 МГц. Часто резонансний метод застосовують у поєднанні з методом заміщення, що дозволяє підвищити точність результату вимірювання. Застосування резонансного методу виправдано на високих частотах. На низьких частотах резонансні явища виражені менш різко, внаслідок чого точність вимірювання стає недостатньою для практичних цілей.

8.2.1 Вимірювання ємності

У найпростішому випадку вимірювальна схема складається з вимірювального генератора високої частоти ГВЧ, коливального контуру (індуктивності L_0 та ємності C_x) і електронного вольтметра V (рис. 8.5). Схему настроюють у резонанс змінюванням частоти f_p генератора, про що судять за максимальним показанням вольтметра. Значення ємності обчислюють за формулою

$$C_x = \frac{1}{4\pi^2 f_p^2 L_0}.$$

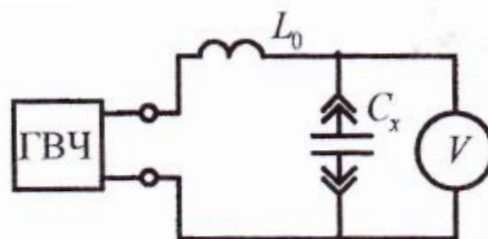


Рисунок 8.5 – Найпростіша схема для вимірювання ємності резонансним методом

Цей спосіб простий, але не забезпечує високої точності. Більшої точності можна досягти, скориставшись поєднанням резонансного методу з методом заміщення. Для вимірювання малих значень ємності збирається схема за рис. 8.6, а; для вимірювання великих значень ємності – схема за рис. 8.6, б. Метод передбачає виконання двох вимірювань. Перше вимірювання виконується так: встановлюють потрібне значення частоти генератора і при відсутності вимірюваної ємності C_x настроюють схему в резонанс змінюванням ємності C_0 . Настроювання схеми в резонанс визначають за максимальними показаннями вольтметра і фіксують значення ємності C_{01} .

Потім конденсатор малої ємності підключається паралельно ємності C_0 , а конденсатор великої ємності – послідовно з ємністю C_0 . Змінюванням ємності C_0 до значення C_{02} настроюють схему в резонанс.

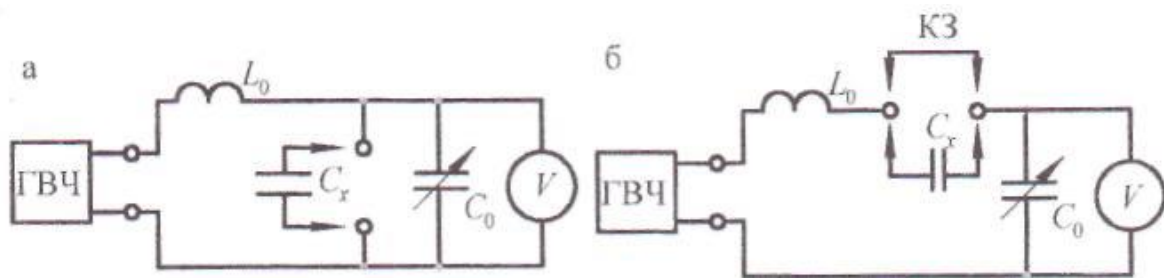


Рисунок 8.6 – Схеми для вимірювання ємності резонансним методом у поєднанні з методом заміщення

Вимірювана мала ємність обчислюється за формулою

$$C_x = C_{01} - C_{02},$$

а велика ємність – за формулою

$$C_x = \frac{C_{01}C_{02}}{C_{02} - C_{01}}.$$

Похибка вимірювання визначається в основному похибками відліку по шкалі робочого конденсатора C_0 , а також похибками відтворення значень ємностей C_{01} і C_{02} .

8.2.2 Вимірювання індуктивності

Вимірювання індуктивностей методом зміщення виконується так. Мала індуктивність L_x вмикається послідовно зі зразковою індуктивністю L_0 (рис. 8.7, а), а велика індуктивність – паралельно конденсатору C_0 (рис. 8.7, б).

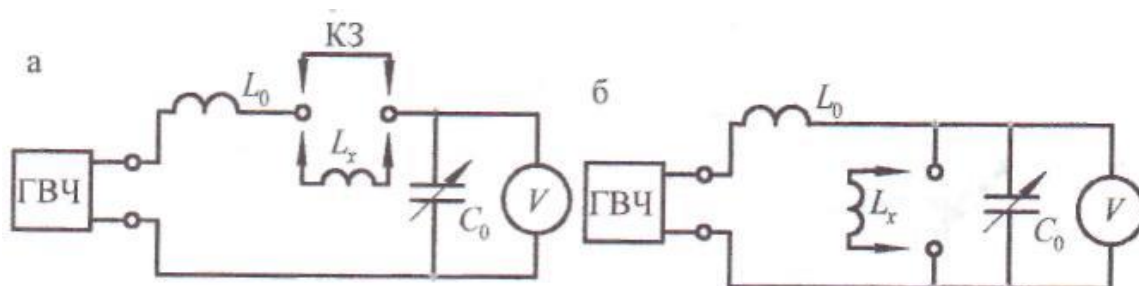


Рисунок 8.7 – Схеми для вимірювання індуктивності резонансним методом у поєднанні з методом заміщення

В обох випадках проводять два експерименти. Перш за все встановлюють потрібну частоту генератора і при відключеній індуктивності L_x настраюють схему в резонанс змінюванням ємності C_0 . Момент резонансу в схемі визначають за максимальним показанням вольтметра. При резонансі

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_0C_{01}}}. \quad (8.8)$$

Потім підключають малу індуктивність і зміною ємності C_0 (при незмінній частоті генератора) знову досягають резонансу в схемі. При цьому те саме значення резонансної частоти визначається іншими значеннями параметрів контуру

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_0 + L_x)C_{02}}}. \quad (8.9)$$

Прирівнюючи праві частини рівнянь (8.8) і (8.9), знайдемо значення вимірюваної індуктивності

$$L_x = L_0 \left(\frac{C_{01}}{C_{02}} - 1 \right).$$

Аналогічно роблять при вимірюванні великого значення індуктивності. Після підключення її до схеми (рис. 8.7, б) і настроювання контуру в резонанс змінуванням ємності C_0 одержують те саме значення резонансної частоти

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{\frac{C_{02}L_0L_x}{L_0 + L_x}}}. \quad (8.10)$$

Прирівнюючи праві частини рівнянь (8.8) і (8.10), дістанемо

$$L_x = L_0 \frac{C_{01}}{C_{02} - C_{01}}.$$

8.2.3 Вимірювання добротності

З відомих різновидів резонансного методу найбільше практичне застосування знайшов метод куметра. Куметр дозволяє вимірювати добротність котушок індуктивностей коливальних контурів та опосередковано вимірювати індуктивність і ємність.

Схема, що пояснює принцип дії куметра, наведена на рис. 8.8. Куметр складається з генератора високої частоти ГВЧ, коливального контуру та індикатора резонансу – електронного вольтметра. Рівень вхідної напруги $U_{вх}$ куметра контролюється за допомогою термоелектричного міліамперметра (мА) або електронного вольтметра (V).

Котушка індуктивності R_xL_x , добротність якої необхідно виміряти, підключається до затискачів " L_x " приладу (рис. 8.8, а). Змінуванням ємності C_0 конденсатора при заданому значенні частоти генератора настроюють коливальний контур L_xC_0 в резонанс.

Добротність котушки індуктивності – це відношення її індуктивного та активного опорів

$$Q_L = \frac{\omega L_x}{R_x}.$$

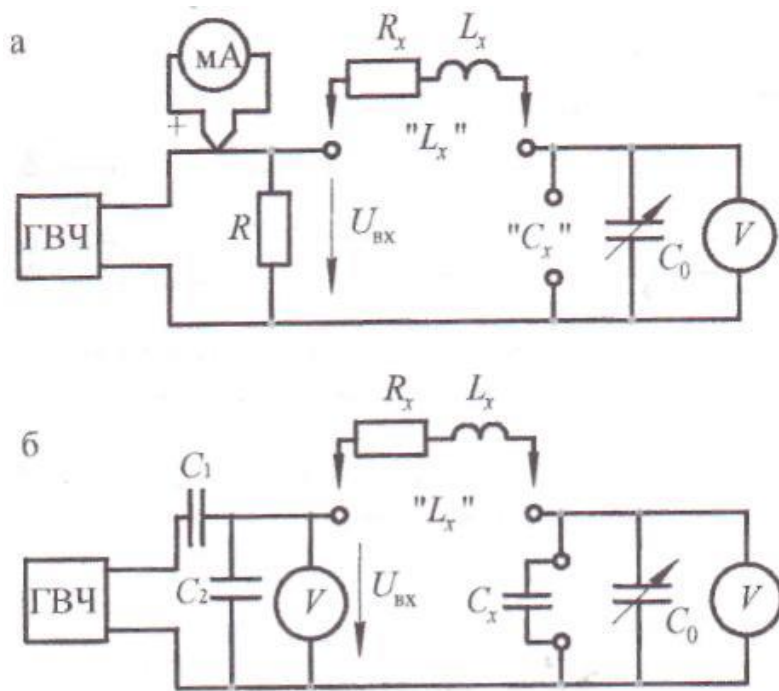


Рисунок 8.8 – Схеми куметрів

Якщо чисельник і знаменник помножити на силу струму, то дістанемо

$$Q_L = \frac{\omega L_x I}{R_x I} = \frac{U_L}{U_a}, \quad (8.11)$$

тобто добротність котушки можна визначити як відношення напруг на індуктивності та активному опорі. Як відомо, при резонансі напруга на індуктивності дорівнює напрузі на ємності ($U_L = U_C$), а напруга на активному опорі – вхідній напрузі контуру ($U_a = U_{\text{вх}}$). Це дає підставу записати рівняння (8.11) в такому вигляді:

$$Q_L = \frac{U_C}{U_{\text{вх}}}.$$

Якщо напругу на вході контуру завжди підтримувати незмінною ($U_{\text{вх}} = \text{const}$), то добротність буде пропорційна напрузі на конденсаторі C_0 , а значення добротності може бути визначене за показаннями вольтметра.

При вимірюванні добротності коливального контуру $L_x C_x$ його котушку $R_x L_x$ підключають до затискачів "L_x", а конденсатор C_x – до затискачів "C_x" приладу (рис. 8.8, б). Ємність робочого конденсатора встановлюють рівною нулю ($C_0 = 0$). Зміною частоти генератора контур $L_x C_x$ настраюють в резонанс. Значення добротності коливального контуру зчитують по шкалі вольтметра.

Основна похибка куметра обумовлена нестабільністю та неточністю встановлення частоти, нестабільністю вихідної напруги генератора, похибками градуювання шкали, неточністю настроювання в резонанс і, як правило, не перевищує $\pm (3 \dots 10) \%$.

Куметр можна використовувати для вимірювання індуктивності котушок та ємності конденсаторів. Для цього конденсатор C_0 має градуюватись в одиницях ємності. При вимірюванні індуктивності котушка підключається до затискачів " L_x " (рис. 8.8, а), встановлюється потрібне (відоме із заданою точністю) значення частоти генератора і зміною ємності C_0 досягається резонанс. Індуктивність обчислюють за формулою

$$L_x = \frac{1}{4\pi^2 f_p^2 C_0}.$$

Для вимірювання ємності C_x конденсатора до затискачів " L_x " (рис. 8.8, б) підключається довільна котушка індуктивності ($R_x L_x$) і, як описано вище, настроюють контур $L_x C_0$ в резонанс з встановленою частотою генератора. Фіксують значення ємності C_{01} . Потім до затискачів " C_x " підключають конденсатор C_x , і зміною ємності C_0 до значення C_{02} настроюють контур на ту ж резонансну частоту. Вимірне значення ємності C_x визначається як різниця двох значень ємності конденсатора C_0

$$C_x = C_{01} - C_{02}.$$

8.3 Генераторний метод

Генераторний метод, який є різновидом резонансного, заснований на зміні частоти генератора при включенні в вимірювальний контур вимірюваних ємності або індуктивності (рис. 8.9).

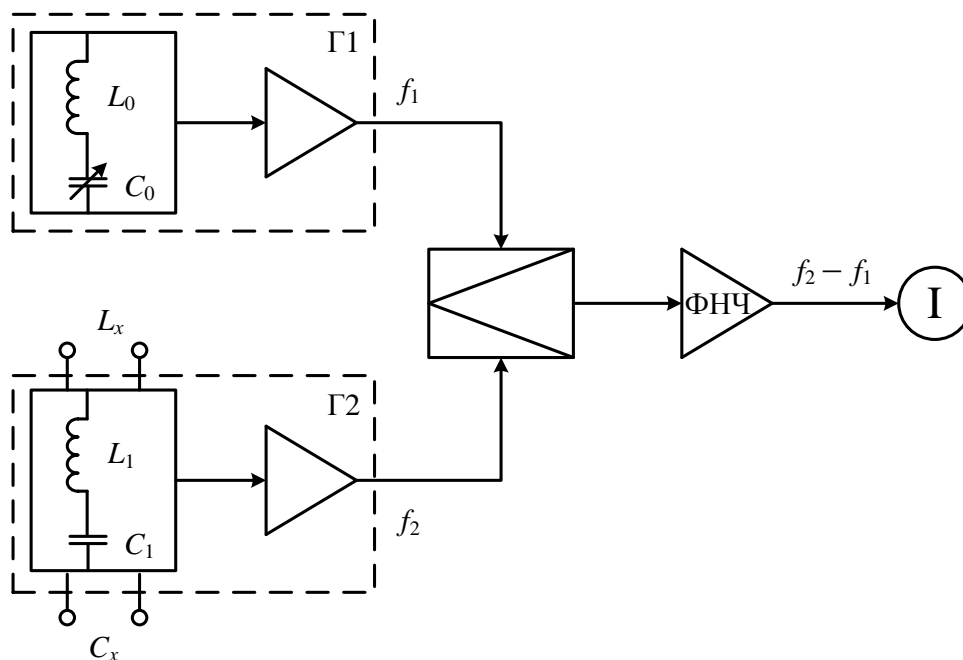


Рисунок 8.9 – Структурна схема приладу, в якому реалізований генераторний метод

Схема має два ідентичних генератора Г1 і Г2. У контур першого з них включені зразкові конденсатори змінної ємності, в контур другого генератора послідовно з котушкою індуктивності, що змінюється дискретно в залежності від обраної межі вимірювання, включають вимірювану котушку L_x . Якщо ж вимірюється ємність, то затискачі L_x закорочуються, а вимірюваний конденсатор включають паралельно контуру генератора Г2 (затискачі C_x).

До включення вимірюваних індуктивності і ємності обидва генератора налаштовують на однакову частоту ($f_1 = f_2$) по нульовим биттям, для чого передбачені змішувач і фільтр нижніх частот ФНЧ. Нульові биття фіксуються або за телефонами, або за індикаторами, на які надходить сигнал нульових биттів, проходячи через детектор. При цьому виконується рівність

$$L_0 C_0 = L_1 C_1. \quad (8.12)$$

Після підключення вимірюваного елемента в контур Г2 частота його змінюється і різницева частота з виходу змішувача не проходить через ФНЧ. Перебудовуючи частоту першого генератора зразковим конденсатором, знову добиваються рівності частот генераторів. Зміна ємності зразкового конденсатора ΔC однозначно визначає вимірювані індуктивність або ємність.

Якщо вимірюється індуктивність, то рівняння балансу частот матиме вигляд

$$L_0(C_0 + \Delta C) = (L_1 + L_x)C_1.$$

Розкриваючи дужки і враховуючи (8.12), отримаємо

$$L_0 \Delta C = L_x C_1,$$

звідки

$$L_x = \frac{L_0}{C_1} \Delta C.$$

Якщо вимірюється ємність, то рівняння балансу частот матиме вигляд

$$L_0(C_0 + \Delta C) = L_1(C_1 + C_x).$$

Розкриваючи дужки і враховуючи (8.12), отримаємо

$$L_0 \Delta C = L_1 C_x,$$

звідки

$$C_x = \frac{L_0}{L_1} \Delta C.$$

Примітним є те, що як при вимірюванні ємності, так і при вимірюванні індуктивності градування зберігається і має лінійний закон. Це дозволяє з високою точністю проводити вимірювання індуктивності в межах від 100 нГн до 1 мГн і ємності в межах від 10 пФ до 10 нФ з точністю не гірше 1...1,5%.