

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 5.

ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ ЗВ'ЯЗАНИХ КОНТУРІВ

Мета роботи: визначення фізичних процесів у системі двох трансформаторно зв'язаних контурів.

КОРОТКІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

1. Коефіцієнт зв'язку. Сукупність двох або більше контурів, увімкнених таким чином, щоб електромагнітні коливання з одного контуру передавались в інший, називається зв'язаними контурами. Контур, коливання в якому збуджується зовнішнім джерелом, називають первинним, а той, в який передається частина енергії з первинного контуру – вторинним.

Контури можуть бути зв'язані між собою різними способами. У цій роботі досліджується двоконтурна схема з трансформаторним зв'язком (рис.1). Електромагнітна енергія з первинного контуру у вторинний передається за допомогою магнітного поля.

Кількісно ступінь зв'язку між контурами оцінюється коефіцієнтом зв'язку

$$K_{зв} = M / \sqrt{L_1 L_2}, \quad (1)$$

де M – коефіцієнт взаємної індукції, L_1, L_2 – індуктивності котушок контурів.

Величина $K_{зв}$ може змінюватись у межах від нуля до одиниці.

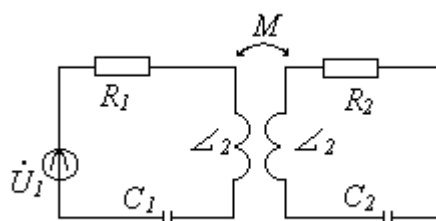


Рис.1

2. Внесені опори. Згідно з другим законом Кірхгофа для системи (рис.1)

$$\left. \begin{aligned} \underline{z}_{11} \dot{I}_1 + \underline{z}_{12} \dot{I}_2 &= \dot{U}_1 \\ \underline{z}_{21} \dot{I}_1 + \underline{z}_{22} \dot{I}_2 &= 0 \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

де $\underline{z}_{11} = R_1 + j(\omega L_1 - 1/\omega C_1)$ – власний комплексний опір первинного контуру; $\underline{z}_{22} = R_2 + j(\omega L_2 - 1/\omega C_2)$ – власний комплексний опір вторинного контуру; $\underline{z}_{12} = \underline{z}_{21} = \underline{z}_{зв} = j\omega M$ – опір зв'язку. Із системи рівнянь (2)

$$\dot{I}_1 = \dot{U}_1 / (\underline{z}_{11} - \underline{z}_{зв}^2 / \underline{z}_{22}). \quad (3)$$

Знаменник останнього виразу відіграє роль вхідного опору (закон Ома)

$$\underline{z}_{вх} = \underline{z}_{11} - \underline{z}_{зв}^2 / \underline{z}_{22} = \underline{z}_{11} + \underline{z}_{вн1}, \quad (4)$$

де $\underline{z}_{вн1}$ – комплексний опір, що внесений із вторинного контуру в первинний.

Введення поняття про внесені опори дозволяє побудувати нерозгалужену схему заміщення зв'язаних контурів (рис.2).

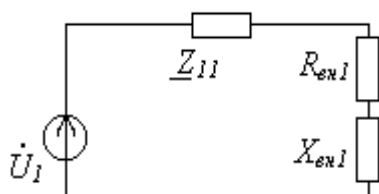


Рис. 2

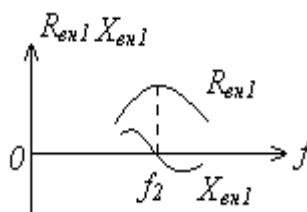


Рис.3

Величини внесених опорів

$$\underline{z}_{вн1} = -z_{зв}^2 / z_{22} = R_{вн1} + jX_{вн1},$$

$$R_{вн1} = (\omega M)^2 R_2 / (R_2^2 + X_2^2), \quad (5)$$

$$X_{вн1} = -(\omega M)^2 X_2 / (R_2^2 + X_2^2), \quad (6)$$

де R_2 і $X_2 = \omega L_2 - 1/\omega C_2$ - активний і реактивний опори вторинного контуру. З рис.3 видно, що $R_{вн1}$ досягає максимуму, а $X_{вн1} = 0$ на резонансній частоті вторинного контуру f_2 . Внесений реактивний опір завжди протилежний за знаком власному опору вторинного контуру X_2 .

Внесений активний опір $R_{вн1}$ враховує енергію, що поглинається активним опором вторинного контуру

$$P_2 = I_2^2 R_2 = I_1^2 R_{вн1}. \quad (7)$$

Внесений реактивний опір зв'язаний з тим, що струм I_2 наводить ЕРС взаємодукції в первинному контурі, фаза якої залежить від характеру опору вторинного контуру.

3. Резонанс у зв'язаних контурах. При настройці зв'язаних коливальних контурів добиваються найбільшого значення струму у вторинному контурі шляхом знаходження оптимальних значень реактивних параметрів системи. У практиці зв'язані контури частіше всього настраюються в повний резонанс.

Настройка в повний резонанс здійснюється в такій послідовності. Між контурами встановлюється послаблений зв'язок, за рахунок збільшення віддалі між ними. Потім настраюють в резонанс перший контур шляхом зміни ємності C_1 . Про наявність резонансу в першому контурі судять по максимуму, наприклад, напруги на конденсаторі C_2 , яка пропорційна струму I_2 (рис.1). Подібним чином настраюють другий контур, змінюючи ємність C_2 . Після цього збільшують коефіцієнт зв'язку, щоб досягти найбільшого значення напруги на конденсаторі C_2 .

З системи рівнянь (2)

$$I_2 = -\dot{U}_1 j\omega M / [z_{11} z_{22} + (\omega M)^2].$$

Коли обидва контури настроєні ($X_1 = 0$ і $X_2 = 0$), то $z_{11} = R_1$ і $z_{22} = R_2$, тоді модуль струму у вторинному контурі

$$I_2 = U_1 X_{зв} / (R_1 R_2 + X_{зв}^2), \quad (8)$$

де $X_{зв} = \omega M$.

Найбільше значення струм $I_2 = I_{m2p}$ досягає при деякому оптимальному опорі зв'язку. Для визначення оптимального опору зв'язку, покладемо похідну від I_2 до $X_{зв}$, яка дорівнює нулю:

$$X_{зв} / (R_1 R_2 + X_{зв}^2) = 0,$$

$$X_{зв.онт} = \sqrt{R_1 R_2}, \quad (9)$$

а оптимальний коефіцієнт зв'язку

$$K_{зв.онт} = \sqrt{d_1 d_2}.$$

Якщо згасання контурів дорівнює ($d_1 = d_2 = d$), то

$$K_{зв.онт} = d. \quad (10)$$

Підставимо (9) у (8), одержимо

$$I_{m2p} = U_1 / 2\sqrt{R_1 R_2}. \quad (11)$$

Якщо після настройки системи у повний резонанс підсилити зв'язок, то зростуть внесені втрати (5) і струм I_2 зменшиться (рис.4). Тепер $R_{вн1} > R_1$ і найбільша потужність у вторинному контурі не виділяється. Проте можна знову досягти виділення найбільшої потужності, якщо дещо розстроїти вторинний контур. У цьому випадку зростає реактивний опір X_2 , що зменшує внесений активний опір $R_{вн1}$ і тому знову можна досягти рівності $R_{вн1} = R_1$, але при частотах більших або менших за резонансну. Ці частоти називають частотами зв'язку (f_1 і f_2 на рис.5). Амплітудно-частотна характеристика при сильному зв'язку ($K_{зв} > d$) стає двогорбою (рис.5).

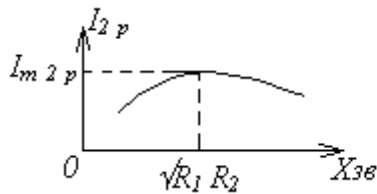


Рис.4

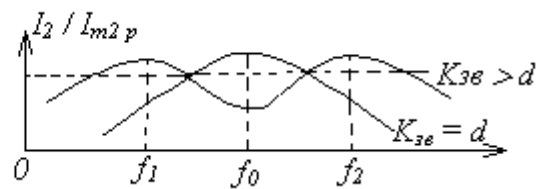


Рис.5

Максимуми струму на частотах зв'язку f_1 і f_2 відповідають випадкам, коли $X_1 - X_{\text{вн1}} = 0$ і $K_{\text{зв.}} > K_{\text{зв.опт.}}$. При збільшенні коефіцієнта зв'язку частота f_1 зменшується, а f_2 збільшується. Зміщення максимумів приводить до зміни смуги прозорості. При $K_{\text{зв.}} \ll d$, $2\Delta f/f_0 = 0,64d$; при $K_{\text{зв.}} = d$, $2\Delta f/f_0 = \sqrt{2}d$. Якщо $K_{\text{зв.}} > d$, то максимальна смуга прозорості відповідає випадку, коли I_2/I_{m2p} спускається до рівня 0,707 (рис.5). У цьому випадку $2\Delta f/f_0 = 3,1d$.

Якщо система зв'язаних контурів настроєна в повний резонанс, тобто

$f_{01} = 1/2\pi\sqrt{L_1C_1} = f_{02} = 1/2\pi\sqrt{L_2C_2}$ і $d_1 = d_2$, то частоти зв'язку визначаються формулами

$$f_1 = f_0 / \sqrt{1 + \sqrt{K_{\text{зв.}}^2 - d^2}} ; f_2 = f_0 / \sqrt{1 - \sqrt{K_{\text{зв.}}^2 - d^2}} . \quad (12)$$

Контрольні запитання

1. Як практично можна змінювати коефіцієнт зв'язку в системі зв'язаних контурів?
2. Як здійснюється настройка зв'язаних контурів на повний резонанс?
3. Поясніть наявність трьох резонансних частот системи зв'язаних контурів при $K_{\text{зв.}} > d$.
4. Поясніть наявність екстремуму залежності $I_{2p} = F(X_{\text{зв.}})$ (рис.4) для системи зв'язаних контурів.
5. Запишіть вираз для внесеного реактивного опору і поясніть його фізичний зміст.
6. Запишіть вираз для внесеного активного опору і поясніть його фізичний зміст.
7. Чим обмежена величина максимально можливої смуги прозорості системи зв'язаних контурів?

Домашнє завдання

1. Вивчити короткі теоретичні відомості про систему зв'язаних контурів.
2. Дати відповіді на запитання у письмовій формі.
3. Для заданої частоти джерела сигналу (дивіться варіанти завдань) і заданих параметрів контурів: $L_1 = 868$ мкГн, $R_1 = 7$ Ом; $R_1 = 75$ Ом; $L_2 = 872$ мкГн; $R_2 = 7$ Ом, обчислити:
 - а) величини ємностей C_1 і C_2 ;
 - б) добротність Q_1 і Q_2 , згасання d_1 і d_2 контурів;
 - в) оптимальний опір зв'язку $X_{\text{зв.опт}}$ і оптимальний коефіцієнт зв'язку $K_{\text{зв.опт}}$.

Примітка. Кожний з контурів настроєний у резонанс з джерелом сигналу.

4. Для випадку оптимального коефіцієнта зв'язку обчислити коефіцієнт передачі системи зв'язаних контурів ($K = U_2/U_1$).

№ варіанта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
f , МГц	0,21	0,22	0,23	0,24	0,25	0,26	0,27	0,28	0,285	0,29

Лабораторне завдання

1. Ознайомитися з макетом системи зв'язаних контурів і приладами, що використовуються в роботі: генератор сигналів GFG-8210, мілівольтметр ВЗ – 38.
2. Зібрати схему вимірювань для дослідження системи зв'язаних контурів (рис.6). На генераторі виставити частоту сигналу синусоїдальної форми, що відповідає вашому варіанту завдання.

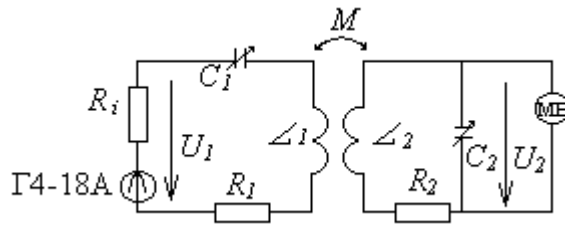


Рис.6

3. Налаштувати кожний з контурів на частоту генератора. З цією метою: а) встановити коефіцієнт зв'язку між контурами $K_{зв} \ll K_{зв.опт}$, збільшивши відстань між котушками; б) змінюючи ємність C_1 , добитися максимум напруги U_2 ; в) змінюючи ємність C_2 , добитися ще більшого зростання напруги U_2 .

Примітка. До закінчення роботи ємності конденсаторів C_1 і C_2 не змінювати.

4. При фіксованій напрузі U_1 зняти залежність $U_2 = F(M)$, де M – зв'язок між котушками.
5. Побудувати графік знятої залежності. За графіком вибрати такі положення котушок, які відповідають таким значенням коефіцієнта зв'язку: а) $K_{зв1} < K_{зв.опт}$; б) $K_{зв2} = K_{зв.опт}$; в) $K_{зв3} > K_{зв.опт}$.
6. Для трьох вибраних фіксованих коефіцієнтів зв'язку зняти амплітудно-частотні характеристики $U_2 = F(f)$. Частоту змінювати у межах від $0,5f_0$ до $1,5f_0$, де f_0 – частота настройки контурів.
7. Побудувати графіки частотних характеристик. З кожного графіка визначити: а) смугу прозорості; б) добротність ($Q = f_0/2\Delta f$); в) значення коефіцієнтів зв'язку, які відповідають частотам зв'язку (для випадку $K_{зв} > K_{зв.опт}$). Порівняти експериментальні дані з розрахунковими.
8. У звіті привести розрахунки, схему вимірювань, графіки і висновки отриманих результатів.

Список літератури

1. Попов В.П., Основы теории цепей. – М.: Высш. шк., 1985. – 496 с.
2. Зернов Н.В., Карпов В.Г. Теория радиотехнических цепей. – Л.: Энергия, 1972-816 с.