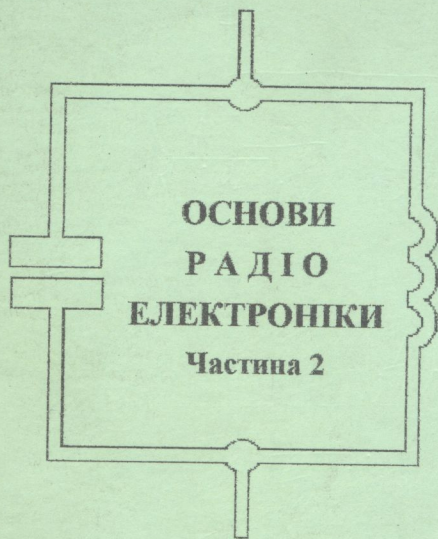


Б21.396.6(075)

К 95



ОСНОВИ
РАДІО
ЕЛЕКТРОНІКИ
Частина 2

М. О. КУЦЕВОЛ

О. М. КУЦЕВОЛ

ОСНОВИ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

3745-29

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

М.О.Куцевол
О.М.Куцевол

ОСНОВИ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ
ЧАСТИНА 2

НТБ ВНТУ



3745-29

621.396.6(075 K 95 2005

Куцевол М. О. Основи радіоелектроніки

Затверджено Вченою радою Вінницького національного технічного університету як лабораторний практикум для студентів напрямів підготовки 0924 – “Телекомунікації”, 0908 – “Електроніка” та 0910 – “Електронні апарати”. Протокол № 8 від 01 квітня 2004 р.



Вінниця ВНТУ 2005

Рецензенти:

С.М.Зленко, доктор технічних наук, професор

В.С.Осадчук, доктор технічних наук, професор

В.І.Ревенюк, кандидат технічних наук, доцент

Рекомендовано до видання Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України

Куцевол М.О., Куцевол О.М.

К95 **Основи радіоелектроніки.** Лабораторний практикум. Частина 2.
– Вінниця: ВНТУ, 2005. – 122 с.

Лабораторний практикум складається з восьми лабораторних робіт. Описи робіт містять короткі теоретичні відомості та програми виконання дослідів, домашні завдання і контрольні запитання. Він розроблений у відповідності з планом кафедри та програмами дисциплін „Основи радіоелектроніки”, “Теорія електричних кіл та сигналів”, “Основи радіотехніки”.

УДК 621.3.011.7.391



ЗМІСТ

	стор.
Вступ	4
Основні правила техніки безпеки в лабораторії	5
1 Лабораторна робота № 3. Дослідження послідовного коливального контура	6
2 Лабораторна робота № 4. Дослідження паралельних коливальних контурів	13
3 Лабораторна робота № 5. Дослідження частотних характеристик електричних кіл	24
4 Лабораторна робота № 6. Проходження АМ-коливань через послідовний коливальний контур	34
5 Лабораторна робота № 7. Дослідження диференціальних та інтегральних властивостей електричних кіл	42
6 Лабораторна робота № 8. Визначення параметрів пасивних чотириполюсників	53
7 Лабораторна робота № 9. Дослідження електричних фільтрів	62
8 Лабораторна робота № 10. Дослідження перехідних процесів в лінійних колах	76
Література	85
Додаток А	86
Додаток Б	92
Додаток В	96

ВСТУП

Лабораторний практикум з навчальної дисципліни “Основи радіоелектроніки” привчає студента до активного експериментування в лабораторії, а це забезпечує більш глибоке розуміння процесів в електричних і радіотехнічних колах, що знаходяться під дією різноманітних сигналів, розвиває вміння складати електричні схеми, користуватись найбільш поширеною радіовимірною апаратурою, довідниковою літературою з радіоелектроніки. Практикум прищеплює творчий підхід до розв’язання практичних проблем і привчає до аналізу та оцінки експериментальних даних.

Підготовка до лабораторного заняття складається з двох частин: ретельного вивчення теорії даного явища і попереднього ознайомлення з приладами та комплексами безпосередньо на робочому місці в лабораторії.

Осмислення результатів експерименту іноді викликає значні труднощі, особливо тоді, коли наявне відставання лекційного курсу від запланованих робіт практикуму. Для усунення такого неузгодження і для поліпшення підготовки студента до занять у даному посібнику перед кожним лабораторним завданням розглядаються короткі теоретичні відомості, потрібні для даної роботи.

При ознайомленні з описом роботи необхідно звернути увагу на контрольні запитання, подані в кінці тексту. Деякі запитання орієнтують студента на теоретичні проблеми, не відображені в коротких теоретичних відомостях практикуму, але знання яких необхідне для глибшого розуміння явищ, що досліджуються. З цими проблемами можна детальніше ознайомитися у наведених в посібнику літературі в процесі підготовки до лабораторних занять.

В деяких роботах, де це необхідно і доречно, передбачається моделювання характеристик окремих кіл та їх аналіз за допомогою ЕОМ.

Під час виконання лабораторного практикуму студент повинен не тільки навчитись правилам експериментування та оформлення результатів досліджень, а також основам їх аналізу.

ОСНОВНІ ПРАВИЛА ТЕХНІКИ БЕЗПЕКИ В ЛАБОРАТОРІЇ

Необхідно пам'ятати, що неуважність і недостатнє знайомство з правилами техніки безпеки та нехтування ними можуть призвести до нещасного випадку, тому допуск до роботи в лабораторії проводиться тільки після ввідного інструктажу.

Перед початком роботи необхідно ознайомитись з особливостями і робочими інструкціями апаратури і приладів, які використовуються при проведенні дослідів, привести в порядок робоче місце, не захарашувати його сторонніми предметами. Виявивши при огляді пошкодження, негайно повідомити викладача чи лаборанта.

Впевнившись у відсутності видимих несправностей та з'ясувавши всі питання, щодо дослідів, можна приступити до виконання лабораторної роботи, отримавши дозвіл викладача чи лаборанта.

Необхідно пам'ятати, що будь-який прилад, який живиться від електричної мережі, є джерелом підвищеної небезпеки, тому всі зміни електричних схем потрібно робити, попередньо вимкнувши джерела живлення. Під час виконання дослідів забороняється відволікатися, займатися сторонніми справами, без нагляду залишати ввімкнені прилади, торкатись металевих частин лабораторних стендів, обладнання, а також труб та батарей опалення.

Ні в якому разі не можна визначати наявність напруги дотиком рук. При неможливості визначити приладом наявність напруги на оголених електричних схем чи шнурах живлення необхідно вважати, що вони знаходяться під напругою.

У випадку ураження когось із присутніх електричним струмом негайно має бути вимкнений загальний вимикач струму. Це має зробити той із присутніх, хто в даний момент знаходиться найближче до вимикача. Після цього необхідно надати потерпілому першу медичну допомогу.

Після закінчення роботи, отримавши дозвіл викладача, можна вимкнути прилади, розібрати електричні схеми. Робоче місце необхідно привести до початкового стану.

1 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3. ДОСЛІДЖЕННЯ ПОСЛІДОВНОГО КОЛИВАЛЬНОГО КОНТУРА

Мета роботи – дослідити резонансні явища та визначити основні параметри послідовного контура

1.1 Короткі теоретичні відомості

Резонансні явища мають велике значення в радіотехніці, оскільки на них ґрунтується робота більшості радіотехнічних пристроїв.

Резонансом називають таке явище в електричному колі, що має індуктивності і ємності, коли частота власних коливань кола збігається з частотою коливань генератора.

Еквівалентний реактивний опір чи реактивна провідність кола, де є резонанс, дорівнюють нулю.

Вхідний комплексний опір послідовного коливального контура (рис 1.1):

$$\underline{Z} = R + j \cdot \left(\omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C} \right) = R + j \cdot (X_L - X_C) = R + j \cdot X = Z \cdot e^{j\varphi}, \quad (1.1)$$

де $X = \omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C}$ - реактивний опір контура;

$Z = \sqrt{R^2 + X^2}$ - повний опір контура;

$\varphi = \arctg \frac{X}{R}$ - фазовий зсув між напругою і струмом.

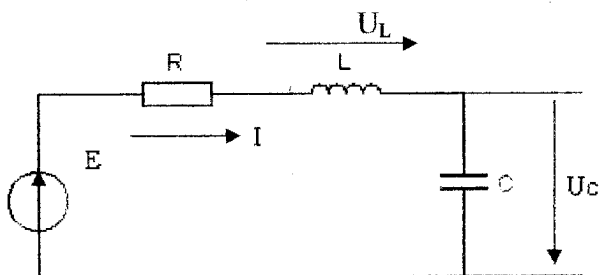


Рисунок 1.1

Умова резонансу: $X_L - X_C = 0$.

При цьому в послідовному коливальному контурі виникає резонанс напруг.

Кутова резонансна частота

$$\omega_F = 2 \cdot \pi \cdot f_p = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}} \quad (1.2)$$

При резонансі напруг використовуються такі співвідношення та формули:

а) характеристичний опір контура – опір кожного з реактивних елементів при резонансі

$$\rho = \omega_p L = \frac{1}{\omega_p C} = \sqrt{\frac{L}{C}}, \quad (1.3)$$

б) добротність контура

$$Q = \frac{\rho}{R}, \quad (1.4)$$

в) згасання контура

$$a = \frac{1}{Q}. \quad (1.5)$$

При резонансі напруг струм в контурі

$$I_P = \frac{E}{R},$$

а напруга на індуктивності дорівнює напрузі на ємності і в Q раз більша напруги генератора

$$U_{L_p} = U_{C_p} = I_P \cdot \rho = E \cdot Q.$$

Розстроювання:

- абсолютне - $\Delta\omega = \omega - \omega_p$ або $\Delta f = f - f_p$;

- відносне - $\delta = \frac{\Delta\omega}{\omega_p} = \frac{\Delta f}{f_p}$;

- узагальнене $\xi = Q \left(\frac{\omega}{\omega_p} - \frac{\omega_p}{\omega} \right)$.

Відношення комплексного опору до резонансного опору контура

$$\begin{aligned} \frac{\dot{Z}}{R} &= \frac{R + j \cdot \left(\omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C} \right)}{R} = 1 + j \cdot \frac{1}{R} \cdot \left(\omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C} \right) = \\ &= 1 + j \cdot \frac{\omega_p \cdot L}{R} \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_p} - \frac{1}{\omega \cdot \omega_p \cdot L \cdot C} \right) = 1 + j \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_p} - \frac{\omega_p}{\omega} \right) = \\ &= 1 + j \cdot \xi \end{aligned} \quad (1.6)$$

Модуль цього виразу

$$\left| \frac{\dot{Z}}{R} \right| = \frac{Z}{R} = \sqrt{1 + Q^2 \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_p} - \frac{\omega_p}{\omega} \right)^2} = \sqrt{1 + \xi^2}, \quad (1.7)$$

Фазовий зсув

$$\varphi = \arctg Q \left(\frac{\omega}{\omega_p} - \frac{\omega_p}{\omega} \right) = \arctg \xi, \quad (1.8)$$

Відношення комплексного струму в контурі до його резонансного значення

$$\frac{I}{I_p} = \frac{\dot{E}_m}{Z} \cdot \frac{R}{\dot{E}_m} = \frac{R}{Z} = \frac{1}{1 + j \cdot Q \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_p} - \frac{\omega_p}{\omega} \right)} = \frac{I_m}{I_p} \cdot e^{-j\varphi}. \quad (1.9)$$

Частотна залежність модуля цього відношення

$$\frac{I_m}{I_{mp}} = \frac{1}{\sqrt{1 + Q^2 \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_p} - \frac{\omega_p}{\omega} \right)^2}} \quad (1.10)$$

називається амплітудно-частотною характеристикою.

Рівняння фазочастотної характеристики

$$\varphi = \arctg \xi = \arctg \frac{X}{R} = \arctg \left[Q \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_p} - \frac{\omega_p}{\omega} \right) \right]. \quad (1.11)$$

При невеликих розстроюваннях

$$\frac{\omega}{\omega_p} - \frac{\omega_p}{\omega} = \frac{2\Delta\omega}{\omega_p} = 2\delta,$$

при цьому вирази (1.7), (1.10), (1.11) набувають такого вигляду:

$$\begin{aligned} \frac{Z}{R} &\approx \sqrt{1 + (2 \cdot \delta \cdot Q)^2}; \\ \frac{I}{I_p} &\approx \frac{1}{\sqrt{1 + 2 \cdot \delta \cdot Q}}; \quad \varphi \approx \arctg(2 \cdot \delta \cdot Q). \end{aligned} \quad (1.12)$$

Смуга пропускання визначається за умови, що струм на частотах $f_{\text{н}}$ і $f_{\text{в}}$, які відповідають межі смуги пропускання, зменшується відносно резонансного в $\sqrt{2}$ раз (рис. 1.2), що дорівнює 3 дБ.

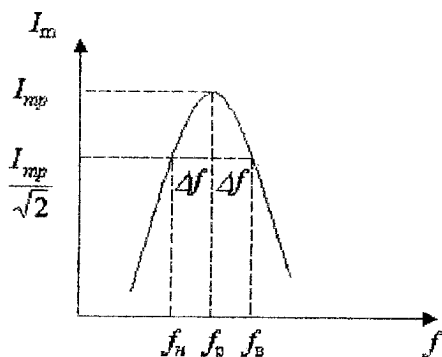


Рисунок 1.2

Абсолютне та відносне значення смуги пропускання визначають за допомогою формул:

$$2 \cdot \Delta f = f_b - f_n = \frac{f_p}{Q}; \quad \frac{2 \cdot \Delta f}{f_p} = \delta = \frac{1}{Q}.$$

Звідси добротність коливального контура

$$Q = \frac{f_p}{\Delta f}. \quad (1.13)$$

При під'єднанні до ємності C паралельно опору навантаження R_H (рис.1.3,а) в послідовний контур додатково вноситься опір втрат R_1 (рис.1.3,б):

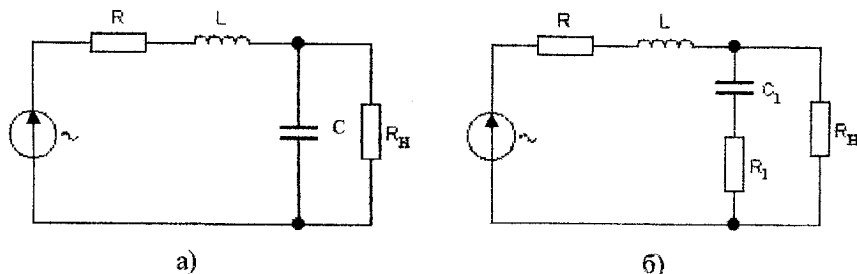


Рисунок 1.3 – Послідовний контур з навантаженням

$$R_1 \approx \frac{1}{R_H \cdot (\omega_p \cdot C)^2} = \frac{\rho^2}{R_H}, \quad (1.14)$$

а ємність залишається практично незмінною:

$$C_1 \approx C. \quad (1.15)$$

Інколи вносимий опір R_I виявляється значно більшим за опір втрат R : $R_I \gg R$. Тоді всі втрати в контурі практично враховуються опором R_I і добротність розраховується так:

$$Q_H \approx \frac{\rho}{R_I} = \frac{R_H}{\rho}. \quad (1.16)$$

Таким чином, чим менший опір навантаження, тим меншою буде добротність.

Живлення контура здійснюється реальним генератором (рис.1.4) і його внутрішній опір також впливає на добротність.

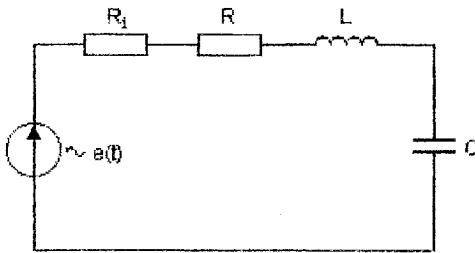


Рисунок 1.4

Добротність такого контура:

$$Q_1 = \frac{\rho}{R + R_I} = \frac{Q}{1 + \frac{R_I}{R}} < Q. \quad (1.17)$$

1.2 Порядок виконання роботи.

1.2.1. Від'єднати R_4 і під'єднати до клем Γ_1 та Γ_3 (рис.1.5) генератор сигналів ГЗ-117 з вихідною напругою U_T , а до гнізд Γ_4 та Γ_3 – вольтметр. Змінюючи частоту на виході генератора, досягнути резонансу в досліджуваному контурі. Порівняти значення f_P з розрахованим в домашньому завданні.

1.2.2. Виміряти напругу U_C на конденсаторі (гнізда Γ_4 , Γ_3) при резонансі і на вході коливального контура U_{R2} (гнізда Γ_2 , Γ_3). Знайти добротність як відношення цих напруг

$$Q = \frac{U_{CP}}{U_{R_2}}$$

та порівняти знайдене значення з результатом, отриманим для добротності в п.1.2.4.

1.2.3. Отримати резонансну криву досліджуваного контура $U_C = \varphi(f_r)$, змінюючи частоту генератора через 1-2 кГц і вимірюючи напругу U_C .

Напругу U_{R_2} підтримувати постійною.

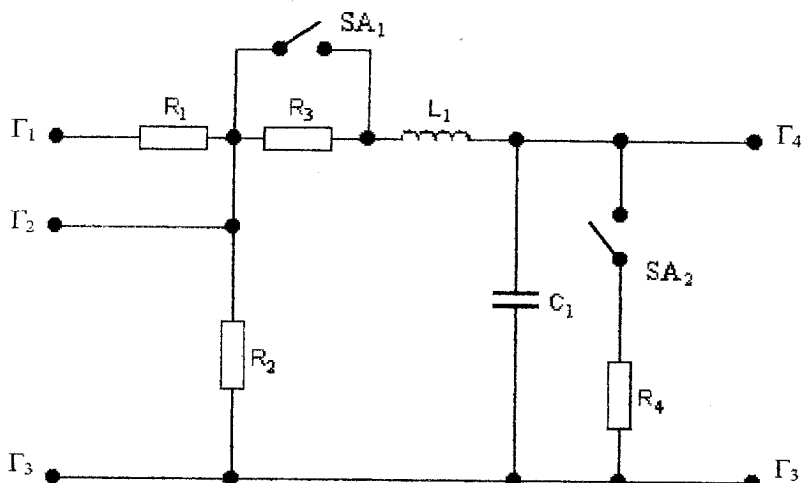


Рисунок 1.5

Ввімкнути в контур додатковий резистор R_3 і ще раз зняти резонансну криву.

При отриманні резонансних кривих обов'язково користуватись ручкою плавного перестроювання частоти генератора ГЗ-117.

Результати вимірів занести до таблиці 1.1.

Таблиця 1.1

f_r , кГц											Примітка
U_C , В											$U_T = ; R_3 = 0$
											$U_T = ; R_3 \neq 0$

1.2.4. Побудувати резонансні криві за п.1.2.3 на одному графіку і визначити за ними смугу пропускання $2 \cdot \Delta f$, добротність Q , індуктивність котушки L та характеристичний опір ρ .

1.2.5. Виконати п.1.2.1 – 1.2.4 для контура з навантаженням R_4 .

1.3 Домашнє завдання.

1.3.1 За допомогою моделювальної програми Electronics Workbench, згідно з даними (рис.1.5) змоделювати амплітудно-частотні характеристики послідовного контура.

1.3.2 Розрахувати резонансну частоту та АЧХ послідовного контура за виразами (1.2) та (1.7).

1.4 Склад звіту:

- короткі теоретичні відомості;
- розрахунки, виконані при підготовці до заняття та моделі АЧХ;
- резонансні криві, одержані в домашньому завданні і в процесі роботи;
- таблиці з експериментальними даними;
- розрахунки параметрів контура, які необхідно провести в ході виконання роботи;
- досліджувані схеми;
- аналіз одержаних результатів.

1.5 Контрольні запитання.

1. Чому резонанс в послідовному контурі називається резонансом напруг?
2. Параметри, що характеризують послідовний контур, їх аналітичні вирази.
3. Яку залежність називають амплітудно-частотною характеристикою послідовного контура?
4. За якої умови реактивний опір послідовного контура має індуктивний характер, а за якої - ємнісний?
5. Як визначити смугу пропускання контура?
6. Як за резонансною кривою визначити добротність контура і опір втрат?
7. Як впливає на послідовний контур опір навантаження?
8. Якому значенню відповідає фазовий зсув між напругою та струмом в контурі на верхній і нижній межі пропускання?
9. Відносні частотні характеристики.
10. Розстроювання: абсолютне, відносне, узагальнене.
11. Максимальна потужність контура.

2 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №4. ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАЛЕЛЬНИХ КОЛИВАЛЬНИХ КОНТУРІВ

Мета роботи – дослідити резонансні явища та визначити основні параметри паралельних контурів

2.1 Короткі теоретичні відомості

2.1.1 Паралельний коливальний контур першого виду (рис.2.1). Паралельним коливальним контуром називають таке електричне коло, в якому джерело енергії, індуктивність і ємність з'єднані паралельно. В такому електричному колі може відбуватись резонанс струмів.

Комплексна провідність кола:

$$\underline{Y} = \left(\frac{R_1}{R_1^2 + X_1^2} + \frac{R_2}{R_2^2 + X_2^2} \right) + j \cdot \left(\frac{X_2}{R_1^2 + X_2^2} - \frac{X_1}{R_2^2 + X_1^2} \right) = g_e + j \cdot b_e. \quad (2.1)$$

В момент резонансу

$$b_{ep} = \left(\frac{X_{p2}}{R_1^2 + X_2^2} - \frac{X_{p1}}{R_2^2 + X_1^2} \right). \quad (2.2)$$

Умова резонансу

$$X_{p2} \cdot (R_1^2 + X_{p1}^2) - X_{p1} \cdot (R_2^2 + X_{p2}^2) = 0. \quad (2.3)$$

З умови резонансу визначається резонансна частота:

$$\omega_{p1} = \frac{1}{\sqrt{L_1 \cdot C_2}} \cdot \sqrt{\rho^2 - R_1^2}. \quad (2.4)$$

З виразу (2.2) знаходимо:

$$\frac{1}{R_2^2 + X_{p2}^2} = \frac{X_{p1}}{X_{p2} \cdot (R_1^2 + X_{p1}^2)}. \quad (2.5)$$

З врахуванням (2.5) знаходимо резонансну провідність контура першого виду:

$$g_{ep} = \frac{R_1}{R_1^2 + X_{p1}^2} + \frac{R_2 \cdot X_{p1}}{X_{p2} \cdot (R_1^2 + X_{p1}^2)} = \frac{R_1 \cdot X_{p2} + R_2 \cdot X_{p1}}{X_{p2} \cdot (R_1^2 + X_{p1}^2)} =$$

$$R_1 + R_2 \cdot \frac{X_{p1}}{X_{p2}} = \frac{R_1 + R_2 \cdot \omega_p^2 \cdot L_1 \cdot C_2}{R_1^2 + X_{p1}^2} = \frac{R_1 + R_2 \cdot \omega_p^2 \cdot L_1 \cdot C_2}{R_1^2 + \omega_p^2 \cdot L_1^2}$$

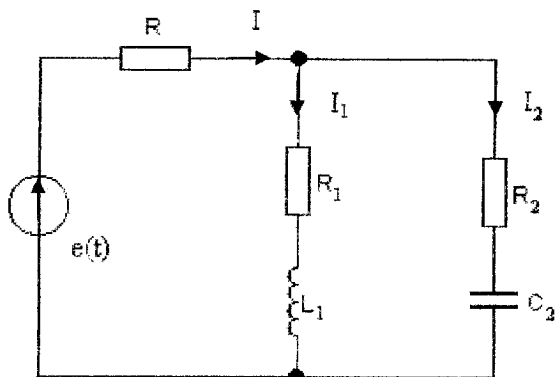


Рисунок 2.1

Опір контура в момент резонансу

$$Z_p = \frac{1}{g_{ep}} = \frac{R_1^2 + \omega_p^2 \cdot L_1^2}{R_1 + R_2 \cdot \omega_p^2 \cdot L_1 \cdot C_2} \quad (2.6)$$

Добротність контура

$$Q = \frac{\omega_p \cdot L_1}{Z_{p1}^2 \cdot g_{ep}} = \frac{\omega_p \cdot L_1}{R_1 + R_2 \cdot \omega_{p1}^2 \cdot L_1 \cdot C_2} \quad (2.7)$$

де Z_{p1} - модуль резонансного опору індуктивної гілки;
 g_{ep} - резонансна провідність контура.

Струм в нерозгалуженій частині кола при резонансі

$$I_p = \frac{E}{R_1 + Z_p}$$

Окремі випадки резонансу струмів для кола (рис. 2.1):
 а) коло не має втрат ($R_L = R_C = 0$). Умова резонансу:

$$\frac{1}{\omega_p \cdot L} = \omega_p \cdot C$$

Кутова резонансна частота

$$\omega_{pI} = \omega_p = \frac{1}{\sqrt{L_1 \cdot C_2}}$$

Резонансний опір контура без втрат $Z_p = \infty$.

б) коло має незначні втрати, тобто $Q \gg 1$. При незначних втратах можна вважати, що

$$\omega_{pI} \approx \omega_p = \frac{1}{\sqrt{L_1 \cdot C_1}}$$

Опір такого контура при резонансі

$$Z_p \approx \frac{\rho^2}{R_1 + R_2} = \frac{\rho^2}{R} = \frac{L_1}{R \cdot C_2}, \quad (2.8)$$

де $R = R_1 + R_2$

в) втрати в ємнісній і індуктивній гілках контура однакові, тобто $R = R_1 = R_2$. При цьому резонансна частота:

$$\omega_{pI} = \omega_p = \frac{1}{\sqrt{L_1 \cdot C_1}}$$

а резонансний опір:

$$R_p = \frac{R^2 + \rho^2}{2 \cdot R}$$

Для більшості контурів можна приймати $R_2 = 0$, тоді приходимо до окремого випадку контура першого виду (рис.2.2).

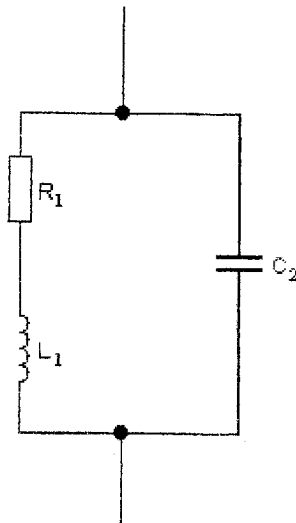


Рисунок 2.2

Резонансна частота такого контура:

$$\omega_p = \frac{1}{\sqrt{L_1 \cdot C_2}} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{R_1}{\rho}\right)^2}, \quad (2.9)$$

а добротність на підставі (2.7)

$$Q = \frac{\omega_p \cdot L_1}{R}.$$

Резонансний опір у відповідності з (2.6) і (2.9)

$$Z_p = \frac{\rho^2}{R_1} = \frac{L_1}{R_1 \cdot C_2}.$$

Струми в кожній з гілок при резонансі приблизно однакові і утворюють так званий контурний струм:

$$I_{p1} \approx I_{p2} \approx I_{pk}.$$

При цьому виконується умова:

$$I_{pk} = Q \cdot I_p,$$

що відображає співвідношення контурного струму і струму в нерозгалуженій частині кола.

При під'єднанні до паралельного контура джерела ЕРС E з внутрішнім опором R_i струм в нерозгалуженій частині і напруга на контурі при будь-якій частоті визначають за формулами:

$$i = \frac{E_T}{R_i + Z}, \quad U = \frac{E_T \cdot Z}{R_i + Z},$$

а при резонансі

$$I_p = \frac{E_T}{R_i + Z_p}, \quad U_p = \frac{E_T \cdot Z_p}{R_i + Z_p}.$$

Відношення комплексної напруги до її резонансного значення:

$$\frac{U}{U_p} = \frac{1}{1 + j \cdot Q_z \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_p} - \frac{\omega_p}{\omega}\right)} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left[Q_z \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_p} - \frac{\omega_p}{\omega}\right)\right]^2}} \cdot e^{-j\varphi_k}, \quad (2.10)$$

де еквівалентна (приведена) добротність

$$Q_z = \frac{Q}{1 + \frac{Z_p}{R_i}} = \frac{\rho}{R + \frac{\rho^2}{R_i}},$$

а кут зсуву фаз напруги на контурі при будь-якій частоті до цієї напруги при резонансі

$$\varphi_E = \arctg \left(Q_E \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_p} - \frac{\omega_p}{\omega} \right) \right).$$

2.1.2 Паралельні контури II і III виду. Паралельний контур II виду (рис.2.3) утворюється шляхом ввімкнення в другу гілку індуктивності L_2 . При цьому реактивні опори гілок

$$X_1 = \omega \cdot L_1; \quad X_2 = \omega \cdot L_2 - \frac{1}{\omega \cdot C_2}. \quad (2.11)$$

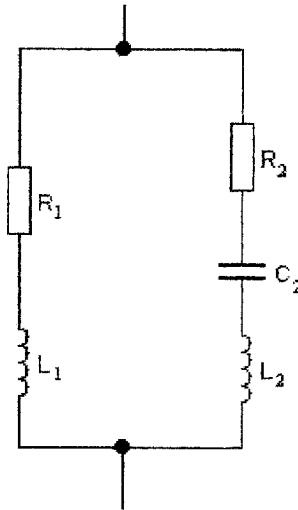


Рисунок 2.3

Оскільки в реальних контурах на частотах, близьких до резонансної,

$$R_1 \ll X_{p1}; \quad R_2 \ll X_{p2}, \quad (2.12)$$

то умовою резонансу буде:

$$-X_{p1} + X_{p2} \approx 0, \quad (2.13)$$

звідки

$$\omega_{pн} \approx \frac{1}{\sqrt{L \cdot C_2}}, \quad (2.14)$$

де $L = L_1 + L_2$ – сумарна індуктивність контура.

Коефіцієнт ввімкнення контура $p = \frac{L_1}{L}$, звідки $L_1 = p \cdot L$, а резонансний опір першої гілки

$$X_{p1} = \omega_{p1} \cdot L_1 = \omega_{p1} \cdot p \cdot L = \sqrt{\frac{L^2}{L \cdot C_2}} \cdot p \approx p \cdot p. \quad (2.15)$$

При виконанні умови (2.12) резонансна провідність контура:

$$g_p = \frac{R_1 + R_2}{X_{p1}^2} \approx \frac{R}{p^2 \cdot p^2},$$

а його резонансний опір

$$Z_{p1} \approx \frac{p^2 \cdot p^2}{R}, \quad (2.16)$$

де R – сумарний опір втрат контура.

Резонансна крива напруги на ємності контура II виду має вигляд (рис. 2.4).

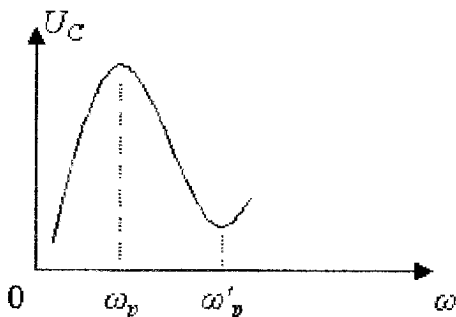


Рисунок 2.4

Ця крива має дві резонансні частоти:

- а) ω_p – частота паралельного резонансу;
- б) ω'_p – частота послідовного резонансу;

Частота послідовного резонансу:

$$\omega'_{p1} = \frac{1}{\sqrt{L_2 \cdot C_2}}. \quad (2.17)$$

Паралельний контур II виду застосовується тоді, коли необхідно під'єднати до нього джерело з внутрішнім опором, значно меншим резонансного опору контура. В цьому випадку під'єднання джерела здійснюється до частини контура в відповідності з коефіцієнтом ввімкнення p . Частота паралельного резонансу при цьому не змінюється, оскільки індуктивність L залишається незмінною, змінюється тільки частота послідовного резонансу, оскільки змінюється L_2 .

Коефіцієнт ввімкнення вибирається з такої умови:

$$p = \frac{R_i}{Z_p},$$

де R_i – внутрішній опір джерела;

Z_p – резонансний опір контура.

Добротність контура II виду:

$$Q = \frac{\rho}{R}, \quad (2.18)$$

де $\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}$ – хвильовий опір контура.

З врахуванням внутрішнього опору генератора

$$Q' = \frac{\rho}{R + \frac{\rho^2}{R_i}}, \quad (2.19)$$

де R_i – внутрішній опір генератора.

Паралельний контур III виду (рис.2.5) утворюється шляхом ввімкнення в першу гілку ємності C_1 . При цьому

$$X_1 = \omega \cdot L_1 - \frac{1}{\omega \cdot C_1}; \quad X_2 = \frac{1}{\omega \cdot C_2}.$$

З врахуванням виразів (2.11) і (2.12) умова резонансу матиме вигляд:

$$\omega_{pIII} \cdot L_1 - \frac{1}{\omega_{pIII} \cdot C_1} - \frac{1}{\omega_{pIII} \cdot C_2} \approx 0,$$

звідки

$$\omega_{pIII} \approx \frac{1}{\sqrt{L_2 \cdot C}}, \quad (2.20)$$

де $C = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}$ - ємність контура III виду при послідовному обходженні.

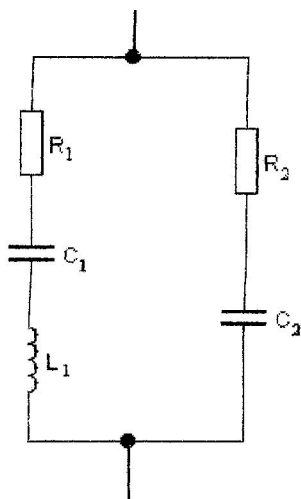


Рисунок 2.5

Коефіцієнт ввімкнення контура III виду:

$$p = \frac{C}{C_2},$$

звідки

$$C_2 = \frac{C}{p},$$

а резонансний опір другої гілки:

$$X_{p2} = \frac{1}{\omega_{pIII} \cdot C_2} = \frac{1}{\omega_{pIII} \cdot C} = \frac{p \cdot \sqrt{L_1 \cdot C}}{C} = p \cdot \sqrt{\frac{L_1 \cdot C}{C_2}} = p \cdot \rho. \quad (2.21)$$

Враховуючи, що резонансний опір контура III виду за виконання умови (2.12)

$$Z_p = \frac{X_{p2}^2}{R},$$

отримаємо з використанням виразу (2.11)

$$Z_p = \frac{P^2 \cdot \rho^2}{R}$$

Резонансна крива контура III виду (рис.2.6) також має окрім паралельного, ще і послідовний резонанс на частоті ω'_p :

$$\omega'_{pm} = \frac{1}{\sqrt{L_1 \cdot C_2}} \quad (2.22)$$

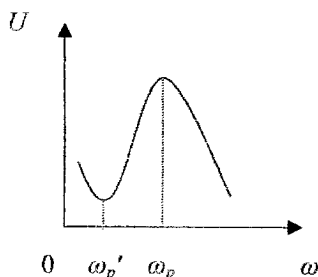


Рисунок 2.6

Добротність контура III виду можна визначити за виразом (2.18), а з урахуванням внутрішнього опору генератора – за виразом (2.19).

Паралельний контур III виду також застосовується для узгодження внутрішнього опору генератора з резонансним опором паралельного контура.

2.2 Домашнє завдання

2.2.1 За допомогою моделювальної програми Electronics Workbench змоделювати амплітудно-частотні характеристики паралельних контурів.

2.2.2 Розрахувати резонансні частоти за виразами (2.4), (2.14), (2.17) та (2.22), а також добротності контурів.

2.3 Порядок виконання роботи.

2.3.1 Дослідження паралельного контура I виду.

2.3.1.1 Під'єднати генератор до клем Γ_5 , Γ_3 (рис.2.7), а вольтметр – до Γ_6 , Γ_3 , перемикачем SA₅ утворити контур I виду.

Перемикачем SA₃ ввімкнути опір R₅. Змінюючи частоту генератора, досягнути резонансу в досліджуваному контурі на резонансній частоті f_p . Порівняти її з розрахованою.

2.3.1.2 Зняти покази і побудувати резонансну криву $U_K = \varphi(f)$. Результати записати до табл.2.1.

Таблиця 2.1

f_r , кГц																			Примітка
U_{R_5}																			$U_r = ; R_5 =$
U_{R_6}																			$U_r = ; R_6 =$

2.3.1.3 Ввімкнути опір R_6 . Зняти покази і побудувати резонансну криву $U_K = \varphi(f)$. Результати занести до табл.2.1. Користуючись резонансною кривою, визначити смугу пропускання та добротність контура.

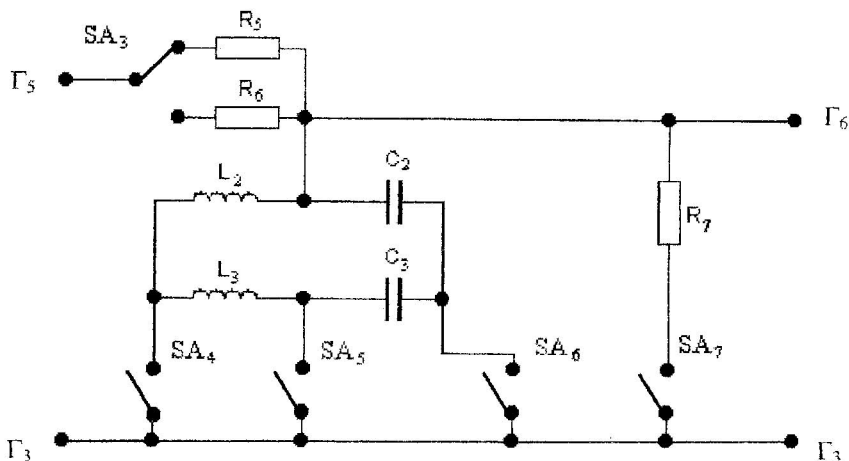


Рисунок 2.7 – Схема паралельних контурів

2.3.1.4 Перемикачем SA_7 ввімкнути опір навантаження R_7 і повторити п.п.2.3.1.1 – 2.3.1.3.

2.3.2 Дослідження паралельного контура II виду.

2.3.2.1 Під'єднати до клем Γ_5, Γ_3 генератор, а до клем Γ_6, Γ_3 – вольтметр, перемикачем SA_4 утворити контур II виду.

2.3.2.2 Змінюючи частоту генератора, визначити f_p і f_p' і порівняти з розрахованими значеннями.

2.3.2.3 Виконати досліди за п.п.2.3.1.2 – 2.3.1.4.

2.3.3 Дослідження паралельного контура III виду.

2.3.3.1 Під'єднати до клем Γ_5, Γ_3 генератор, а до клем Γ_6, Γ_3 – вольтметр, перемикачем SA_5 утворити контур III виду.

2.3.3.2 Змінюючи частоту генератора, визначити f_p і f_p' і порівняти з розрахованими значеннями.

2.3.3.3 Виконати досліди за п.п.2.3.1.2 – 2.3.1.4.

2.4 Склад звіту:

- короткі теоретичні відомості;
- досліджувані схеми;
- таблиці з експериментальними даними;
- графіки;
- розрахунки і результати моделювання;
- висновки.

2.5 Контрольні запитання.

1. Резонанс струмів.
2. Коли еквівалентний опір паралельного контура приймає індуктивний, а коли ємнісний характер?
3. Фазо-частотна характеристика контура.
4. Параметри контура при малих розстроюваннях.
5. Окремі випадки контура I виду.
6. Як впливає на добротність контура I виду внутрішній опір генератора?
7. Як взаємопов'язані добротність і смуга пропускання контура?
8. Як змінюється резонансне значення напруги на паралельному контурі I виду від зміни внутрішнього опору генератора?
9. Паралельні контури II і III виду.
10. Частотні залежності контурів II і III виду.
11. Добротності контурів II і III виду.
12. Вплив внутрішнього опору генератора на добротність контурів II і III виду.
13. Коефіцієнти ввімкнення
14. Резонансний опір контурів II і III виду.
15. З яких міркувань вибирають коефіцієнт ввімкнення контурів II і III виду.

3 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №5. ДОСЛІДЖЕННЯ ЧАСТОТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ

Мета роботи – визначити експериментально частотні характеристики RL – і RC-кіл, розрахувати їх аналітичні вирази, побудувати теоретичні графічні залежності, змоделувати їх за допомогою ЕОМ та порівняти між собою.

3.1 Короткі теоретичні відомості

Залежність величин, що характеризують процеси в електричному колі, від частоти називають частотними характеристиками даного кола.

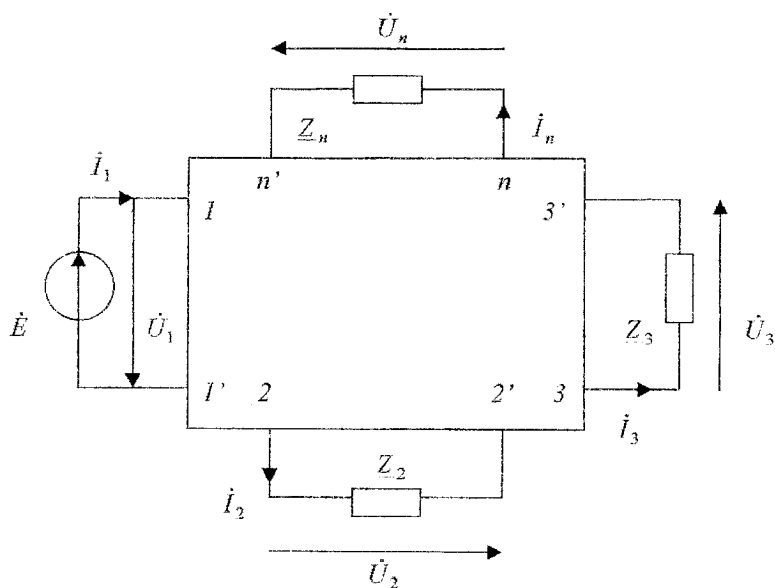


Рисунок 3.1 – Узагальнене зображення електричного кола у вигляді багатополосника

Будь-яка схема може бути подана у вигляді пасивного багатополосника (рис.3.1), з якого виділені джерела зовнішньої дії і ті пасивні елементи, на яких необхідно дослідити відгуки на ці дії.

Інколи полюси 1-1', до яких під'єдване джерело зовнішньої дії, називаються вхідними. Полюси 2-2', 3-3', ..., n-n', на яких визначається відгук, називаються вихідними.

Нехай зовнішня дія – гармонічна величина

$$x(t) = X_m \cdot \cos(\omega t + \psi_x)$$

і її комплексне зображення в діапазоні частот

$$\dot{X} = \dot{X}_m \cdot e^{j\omega t}$$

Тоді відгук на цю дію в опорі Z_n буде

$$y(t) = Y_m(\omega) \cdot \cos(\omega t + \psi_y),$$

а його комплексне зображення:

$$\dot{Y} = \dot{Y}_m(\omega) \cdot e^{j\omega t},$$

де: $\dot{X}_m = X_m \cdot e^{j\psi_x}$ - комплексна амплітуда вхідної дії;

$\dot{Y}_m(\omega) = Y_m(\omega) \cdot e^{j\psi_y(\omega)}$ - комплексна амплітуда вихідної дії, модуль і аргумент якої залежить від частоти.

Комплексною частотною характеристикою (КЧХ) кола називають відношення комплексного відгуку до комплексної вхідної дії:

$$\begin{aligned} F(j\omega) &= \frac{\dot{Y}}{\dot{X}} = \frac{Y_m(\omega) \cdot e^{j\psi_y(\omega)} \cdot e^{j\omega t}}{X_m \cdot e^{j\psi_x} \cdot e^{j\omega t}} = \frac{Y_m(\omega) \cdot e^{j\psi_y(\omega)}}{X_m \cdot e^{j\psi_x}} = \\ &= \frac{Y_m(\omega)}{X_m} \cdot e^{j[\psi_y(\omega) - \psi_x]} = F(\omega) \cdot e^{j\varphi(\omega)}, \end{aligned} \quad (3.1)$$

де $F(\omega) = \frac{Y_m(\omega)}{X_m}$ - амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) кола;

$\varphi(\omega) = \psi_y(\omega) - \psi_x$ - фазо-частотна характеристика (ФЧХ) кола.

АЧХ і ФЧХ кола можуть бути зображені графіками або таблицями числових значень.

Аналітичний вираз КЧХ часто називають комплексною частотною функцією. Якщо відома КЧХ, то відгук $\dot{Y}_m(\omega)$ кола на зовнішню дію X_m знаходять з виразу:

$$\dot{Y}_m(\omega) = F(j\omega) \cdot \dot{X}_m. \quad (3.2)$$

Частотні характеристики поділяються на вхідні і передатні.

Якщо віддуком на вхідну напругу \dot{U}_{m1} в діапазоні частот є вхідний струм $\dot{I}_{m1}(\omega)$, тоді комплексна частотна характеристика

$$\dot{Y}_{ax}(j\omega) = \frac{\dot{I}_{m1}(\omega)}{\dot{U}_{m1}} = \frac{I_{m1}(\omega)}{U_{m1}} \cdot e^{j[\psi_I(\omega) - \psi_U]} = Y_{ax}(\omega) \cdot e^{j\varphi_y(\omega)}$$

називається вхідною провідністю досліджуваного кола.

У випадку, коли віддуком є вхідна напруга при заданому вхідному струмі, маємо залежність:

$$Z_{\text{вх}}(j\omega) = \frac{\dot{U}_{m1}(\omega)}{\dot{I}_{m1}} = \frac{U_{m1}(\omega)}{I_{m1}} \cdot e^{j[\psi_{u_1}(\omega) - \psi_{i_1}]} = Z_{\text{вх}}(\omega) \cdot e^{j\varphi_2(\omega)},$$

яка називається вхідним опором.

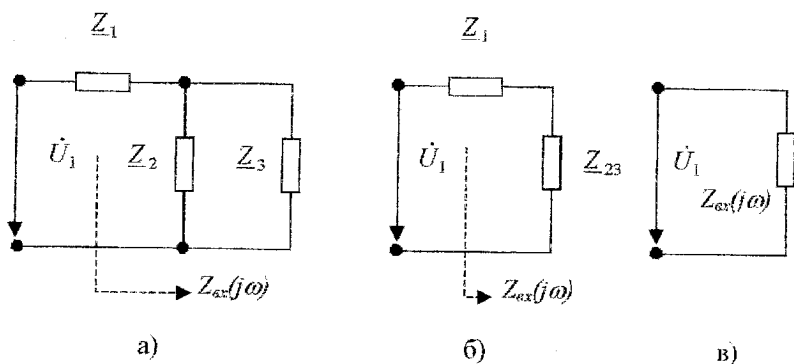


Рисунок 3.2 – Послідовність знаходження вхідного опору методом еквівалентних перетворень.

Вхідний опір та вхідну провідність кола можна знаходити методом еквівалентних перетворень (рис. 3.2)

$$Z_{\text{вх}}(j\omega) = Z_1 + \frac{Z_2 \cdot Z_3}{Z_2 + Z_3}; \quad Y_{\text{вх}}(j\omega) = \frac{1}{Z_{\text{вх}}(j\omega)}. \quad (3.3)$$

Якщо відгук на вхідну дію визначають на полюсах 2-2', 3-3', ..., n-n', то комплексна частотна характеристика називається передатною характеристикою.

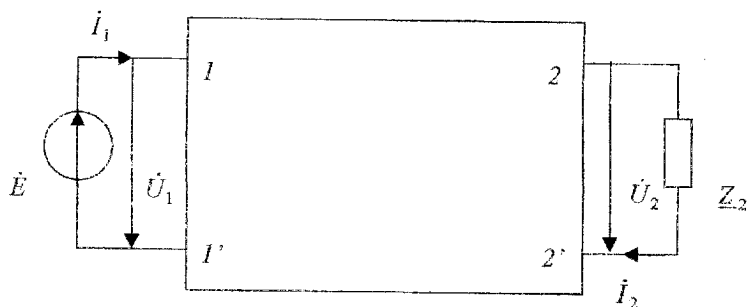


Рисунок 3.3 – Узагальнена схема електричного кола з вхідними 1-1' і вхідними 2-2' полюсами.

Для схеми (рис.3.3) можливі чотири різновиди передатних характеристик:

1) вхідна дія - \dot{U}_{m1} , а вихідна - $\dot{I}_{m2}(\omega)$. Комплексна частотна характеристика в цьому випадку називається передатною провідністю:

$$Y_{21}(j\omega) = \frac{\dot{I}_{m2}(\omega)}{\dot{U}_{m1}} = \frac{I_{m2}(\omega)}{U_{m1}} \cdot e^{j[\psi_{I_2}(\omega) - \psi_{U_1}]} = Y_{21}(\omega) \cdot e^{j\varphi_{Y_{21}}(\omega)}; \quad (3.4)$$

2) вхідна дія - \dot{I}_{m1} , а вихідна $\dot{U}_{m2}(\omega)$. При цьому КЧХ:

$$Z_{21}(j\omega) = \frac{\dot{U}_{m2}(\omega)}{\dot{I}_{m1}} = \frac{U_{m2}(\omega)}{I_{m1}} \cdot e^{j[\psi_{U_2}(\omega) - \psi_{I_1}]} = Z_{21}(\omega) \cdot e^{j\varphi_{Z_{21}}(\omega)} \quad (3.5)$$

і називається передатним опором;

3) вхідна дія - \dot{U}_{m1} , а вихідна $\dot{U}_{m2}(\omega)$. Тоді КЧХ буде такою:

$$K_U(j\omega) = \frac{\dot{U}_{m2}(\omega)}{\dot{U}_{m1}} = \frac{U_{m2}(\omega)}{U_{m1}} \cdot e^{j[\psi_{U_2}(\omega) - \psi_{U_1}]} = K_U(\omega) \cdot e^{j\varphi_{K_U}(\omega)} \quad (3.6)$$

і називається передатною характеристикою по напрузі;

4) вхідна дія - \dot{I}_{m1} , вихідна - $\dot{I}_{m2}(\omega)$. Тоді КЧХ:

$$K_I(j\omega) = \frac{\dot{I}_{m2}(\omega)}{\dot{I}_{m1}} = \frac{I_{m2}(\omega)}{I_{m1}} \cdot e^{j[\psi_{I_2}(\omega) - \psi_{I_1}]} = K_I(\omega) \cdot e^{j\varphi_{K_I}(\omega)} \quad (3.7)$$

і називається передатною характеристикою по струму.

Розглянемо схему електричного кола з послідовним з'єднанням активного R і реактивного X опорів (рис.3.4) та знайдемо його частотні характеристики ($X > 0$):

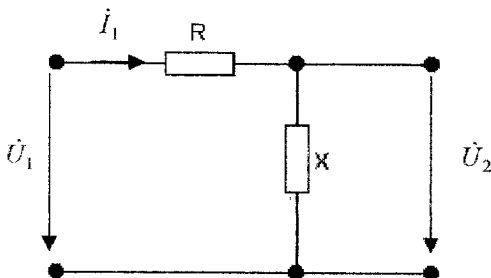


Рисунок 3.4 – Схема електричного кола з послідовним з'єднанням активного і реактивного опорів.

а) вхідний опір:

$$Z_{ex}(j\omega) = R + j \cdot X = \sqrt{R^2 + X^2} \cdot e^{j \cdot \arctg \frac{X}{R}} = Z_{ex}(\omega) \cdot e^{j \cdot \varphi_{ex}(\omega)};$$

б) вхідна провідність:

$$Y_{ex}(j\omega) = \frac{1}{Z_{ex}(j\omega)} = \frac{1}{Z_{ex}(\omega)} \cdot e^{-j \cdot \varphi_{ex}(\omega)} = Y_{ex}(\omega) \cdot e^{-j \cdot \varphi_{ex}(\omega)};$$

в) передатний опір:

$$Z_{21}(j\omega) = \frac{\dot{U}_{m2}(\omega)}{\dot{I}_{m1}}; \quad \dot{U}_{m2} = \dot{I}_{m1}(\omega) \cdot j \cdot X;$$

$$\dot{I}_{m1}(\omega) = \frac{\dot{U}_{m1}}{Z_{ex}(j\omega)} = \frac{U_{m1} \cdot e^{j \cdot 0^0}}{\sqrt{R^2 + X^2} \cdot e^{j \cdot \arctg \frac{X}{R}}};$$

$$\dot{U}_{m2}(\omega) = \frac{U_{m1} \cdot j \cdot X}{\sqrt{R^2 + X^2} \cdot e^{j \cdot \arctg \frac{X}{R}}};$$

$$Z_{21}(j\omega) = j \cdot X = X \cdot e^{j \cdot 90^0}.$$

г) передатна характеристика за напругою:

$$K_U(j\omega) = \frac{\dot{U}_{m2}(\omega)}{\dot{U}_{m1}};$$

$$K_U(\omega) = \frac{j \cdot X}{\sqrt{R^2 + X^2} \cdot e^{j \cdot \arctg \frac{X}{R}}} = \frac{X}{\sqrt{R^2 + X^2}} \cdot e^{j \left(90^0 - \arctg \frac{X}{R} \right)}.$$

3.2 Домашнє завдання.

3.2.1 Знайти аналітичні вирази $K_p(j\omega)$ досліджуваних схем і побудувати теоретичні графіки їх модулів і аргументів для заданих значень R, L і C.

3.2.2 За допомогою моделювальної програми Electronics Workbench отримати моделі АЧХ і ФЧХ цих схем.

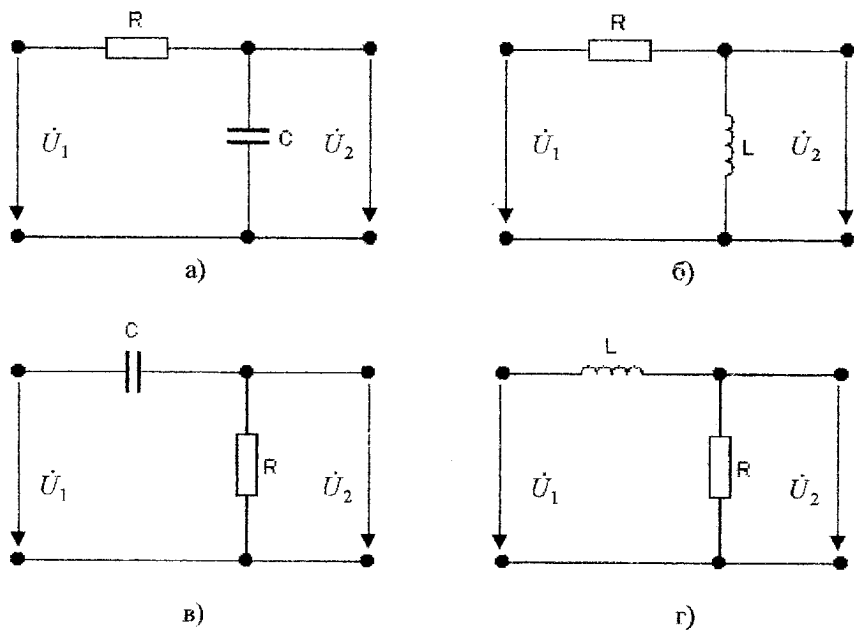


Рисунок 3.5 – Досліджувані схеми.

3.3 Порядок виконання роботи.

3.3.1 Дослідження RC-кола (рис.3.5, а).

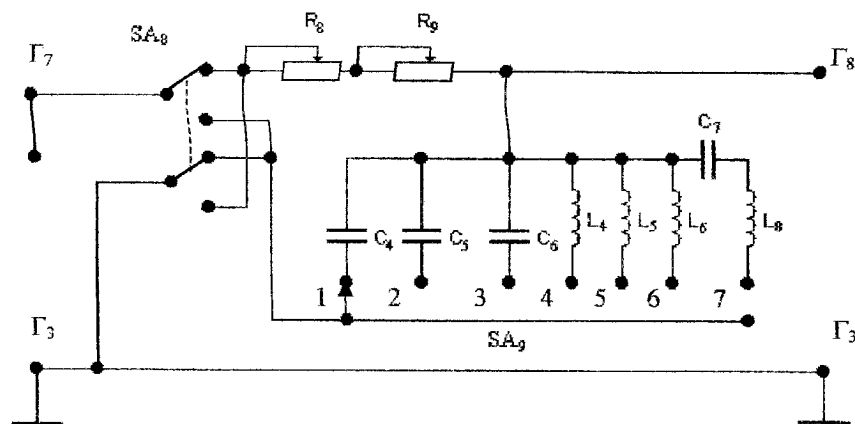


Рисунок 3.6

3.3.1.1 Генератор ГЗ-117 під'єднати до гнізд Γ_7, Γ_3 (рис.3.6), а вольтметр – до Γ_8, Γ_3 , перемикач SA_8 встановити у верхнє положення, перемикач SA_9 - в положення 1, вибравши для RC-кола ємність C_4 , $U_1 = 1$ В.

3.3.1.2 За допомогою змінних опорів R_8 і R_9 встановити задане значення R_1 RC-кола.

3.3.1.3 Змінюючи частоту вихідної напруги генератора зняти характеристику $U_2(f) = K(f)$. Результати досліду занести до табл.3.1.

3.3.1.4 Повторити досліди п.п.3.3.1.2 і 3.3.1.3 для заданого опору R_2 .

Таблиця 3.1

		f																
U_2	$R = R_1$	$C = C_4$																
		$C = C_5$																
		$C = C_6$																
	$R = R_2$	$C = C_4$																
		$C = C_5$																
		$C = C_6$																

3.3.1.5 Встановити перемикач SA_9 в положення 2, вибравши для RC-кола ємність C_5 і повторити досліди за п.п.3.3.1.2 – 3.3.1.4.

3.3.1.6 Встановити перемикач SA_9 в положення 3, вибравши для RC-кола ємність C_6 і повторити досліди за п.п.3.3.1.2 – 3.3.1.4.

3.3.2 Дослідження RL-кола (рис.3.5, б).

3.3.2.1 Генератор ГЗ-117 під'єднати до гнізд Γ_7, Γ_3 (рис.3.6), а вольтметр – до Γ_8, Γ_3 , перемикач SA_8 встановити у верхнє положення, перемикач SA_9 - в положення 4, вибравши для RL-кола індуктивність L_4 , $U_1 = 1$ В.

Таблиця 3.2

		f																
U_2	$R = R_1$	$L = L_4$																
		$L = L_5$																
		$L = L_6$																
	$R = R_2$	$L = L_4$																
		$L = L_5$																
		$L = L_6$																

3.3.2.2 За допомогою змінних опорів R_8 і R_9 встановити задане значення R_1 RL-кола.

3.3.2.3 Змінюючи частоту вихідної напруги генератора зняти характеристику $U_2(f) = K(f)$. Результати дослідів занести до табл.3.2.

3.3.2.4 Повторити дослід п.п.3.3.2.2 і 3.3.2.3 для заданого опору R_2 .

3.3.2.5 Встановити перемикач SA_9 в положення 5, вибравши для RL-кола ємність C_5 і повторити дослід за п.п.3.3.2.2 – 3.3.2.4.

3.3.2.6 Встановити перемикач SA_9 в положення 6, вибравши для RL-кола ємність C_6 і повторити дослід за п.п.3.3.2.2 – 3.3.2.4.

3.3.3 Дослідження CR-кола (рис.3.5, в).

3.3.3.1 Генератор ГЗ-117 під'єднати до гнізд Γ_7 , Γ_3 (рис.3.6), а вольтметр – до Γ_8 , Γ_3 , перемикач SA_8 встановити у нижнє положення, перемикач SA_9 - в положення 1, вибравши для CR-кола ємність C_4 , $U_{\Gamma} = 1В$.

3.3.3.2 За допомогою змінних опорів R_8 і R_9 встановити задане значення R_1 CR-кола.

3.3.3.3 Змінюючи частоту вихідної напруги генератора зняти характеристику $U_2(f) = K(f)$. Результати дослідів занести до табл.3.3.

3.3.3.4 Повторити дослід п.п.3.3.3.2 і 3.3.3.3 для заданого опору R_2 .

Таблиця 3.3

		f													
U_2	$R = R_1$	$C = C_4$													
		$C = C_5$													
		$C = C_6$													
	$R = R_2$	$C = C_4$													
		$C = C_5$													
		$C = C_6$													

3.3.3.5 Встановити перемикач SA_9 в положення 2, вибравши для RC-кола ємність C_5 і повторити дослід за п.п.3.3.3.2 – 3.3.3.4.

3.3.3.6 Встановити перемикач SA_9 в положення 3, вибравши для RC-кола ємність C_6 і повторити дослід за п.п.3.3.3.2 – 3.3.3.4.

3.3.4 Дослідження LR-кола (рис.3.5, г).

3.3.4.1 Генератор ГЗ-117 під'єднати до гнізд Γ_7 , Γ_3 (рис.3.6), а вольтметр – до Γ_8 , Γ_3 , перемикач SA_8 встановити у нижнє положення, перемикач SA_9 - в положення 4, вибравши для LR-кола індуктивність L_4 , $U_{\Gamma} = 1В$.

3.3.4.2 За допомогою змінних опорів R_8 і R_9 встановити задане значення R_1 LR-кола.

3.3.4.3 Змінюючи частоту вихідної напруги генератора зняти характеристику $U_2(f) = K(f)$. Результати дослідів занести до табл.3.4.

3.3.4.4 Повторити дослід п.п.3.3.4.2 і 3.3.4.3 для заданого опору R_2 .

Таблиця 3.4

		f												
U_2	$R = R_1$	$L = L_4$												
		$L = L_5$												
		$L = L_6$												
	$R = R_2$	$L = L_4$												
		$L = L_5$												
		$L = L_6$												

3.3.4.5 Встановити перемикач SA_9 в положення 5, вибравши для LR-кола ємність C_5 і повторити досліди за п.п.3.3.4.2 – 3.3.4.4.

3.3.4.6 Встановити перемикач SA_9 в положення 6, вибравши для LR-кола ємність C_6 і повторити досліди за п.п.3.3.4.2 – 3.3.4.4.

3.3.5 Дослідження RLC-кола (рис.3.7, а).

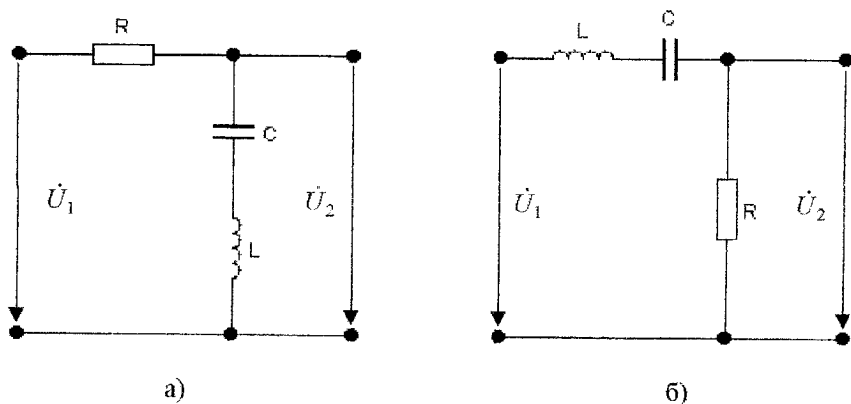


Рисунок 3.7 – Досліджувані кола з двома реактивними елементами

3.3.5.1 Генератор ГЗ-117 під'єднати до гнізд Γ_7 , Γ_3 (рис.3.6), до гнізд Γ_8 , Γ_3 – вольтметр, перемикач SA_8 встановити у верхнє положення, перемикач SA_9 - в положення 7, $U_{\Gamma} = 1$ В.

3.3.5.2 За допомогою змінних опорів R_8 і R_9 встановити задане значення R_1 RLC-кола.

3.3.5.3 Змінюючи частоту вихідної напруги генератора зняти характеристику $U_2(f) = K(f)$. Результати досліду занести до табл.3.5.

3.3.5.4 Повторити досліди п.п.3.3.5.2 і 3.3.5.3 для заданого опору R_2 .

Таблиця 3.5

f																				
U_2	$R = R_1$																			
	$R = R_2$																			

3.3.6 Дослідження LCR-кола (рис.3.7, б).

3.3.6.1 Генератор ГЗ-117 під'єднати до гнізд Γ_7 , Γ_3 (рис.3.6), до гнізд Γ_8 , Γ_3 – вольтметр, перемикач SA_8 встановити у нижнє положення, перемикач SA_9 - в положення 7, $U_{\Gamma} = 1$ В.

3.3.6.2 За допомогою змінних опорів R_8 і R_9 встановити задане значення R_1 LCR-кола.

3.3.6.3 Змінюючи частоту вихідної напруги генератора зняти характеристику $U_2(f) = K(f)$. Результати досліду занести до табл.3.6.

3.3.6.4 Повторити досліди п.п.3.3.6.2 і 3.3.6.3 для заданого опору R_2 .

Таблиця 3.6

f																				
U_2	$R = R_1$																			
	$R = R_2$																			

3.3.7.1 У відповідності з даними табл.3.1 – 3.6 побудувати графіки частотних характеристик.

3.4 Зміст звіту.

Звіт повинен включати короткі теоретичні відомості, досліджувані схеми, аналітичні вирази АЧХ та їх графіки, таблиці з результатами вимірів, графіки експериментальних частотних залежностей, результати моделювання на ЕОМ та короткі висновки за результатами роботи.

3.5 Контрольні запитання.

1. Комплексна частотна характеристика.
2. Амплітудно-частотна характеристика.
3. Фазо-частотна характеристика.
4. Вхідні комплексні частотні характеристики.
5. Передатні характеристики.

Примітка: окрім цього, студент при захисті повинен вміти вивести аналітичний вираз заданої частотної характеристики заданого електричного кола та побудувати її орієнтовний графік.

4 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №6. ПРОХОДЖЕННЯ АМ-КОЛИВАНЬ ЧЕРЕЗ ПОСЛІДОВНИЙ КОЛИВАЛЬНИЙ КОНТУР

Мета роботи – дослідження спотворень сигналу, які виникають при проходженні АМ-коливань через послідовний коливальний контур.

4.1 Короткі теоретичні відомості

Амплітудно-модульованим (АМ) коливанням називається таке коливання, амплітуда якого змінюється в часі за законом керувального сигналу, що містить інформацію.

Якщо керувальний (модулювальний) сигнал є гармонічним коливанням з частотою Ω , то миттєве значення АМ-коливання може бути знайдене за виразом:

$$u(t) = U_m \cdot (1 + M \cdot \cos \Omega t) \cdot \cos \omega_H t, \quad (4.1)$$

де $\omega_H = 2 \cdot \pi \cdot f_H$ - частота носійного коливання;

$\Omega = 2 \cdot \pi \cdot F$ - частота модулювального коливання;

U_m - амплітуда носійного коливання;

$U_m \cdot (1 + M \cdot \cos \Omega t)$ - обвідна амплітуди керувального коливання;

$M = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{U_{\max} + U_{\min}}$ - коефіцієнт глибини модуляції.

Значення U_{\max} , U_{\min} легко визначити з осцилограми АМ-коливання (рис.4.1).

Залежність (4.1) можна подати в вигляді суми гармонічних коливань:

$$u(t) = U_m \cdot \cos \omega_H t + \frac{M \cdot U_m}{2} \cdot \cos(\omega_H + \Omega) \cdot t + \frac{M \cdot U_m}{2} \cdot \cos(\omega_H - \Omega) \cdot t. \quad (4.2)$$

З формули (4.2) видно, що спектр АМ-коливання при тональній модуляції складається з трьох високочастотних складових (рис.4.2): носійного коливання з частотою ω_H і двох бічних коливань з частотами $\omega_H - \Omega$ і $\omega_H + \Omega$ симетрично розташованих відносно частоти носійного коливання ω_H . Амплітуда бічних складових дорівнює $\frac{M \cdot U_m}{2}$ і не перевищує половини амплітуди носійного коливання.

Корисна інформація при АМ знаходиться в бічних складових модульованого сигналу.

Розглянемо особливості проходження АМ-сигналу через послідовний коливальний контур.

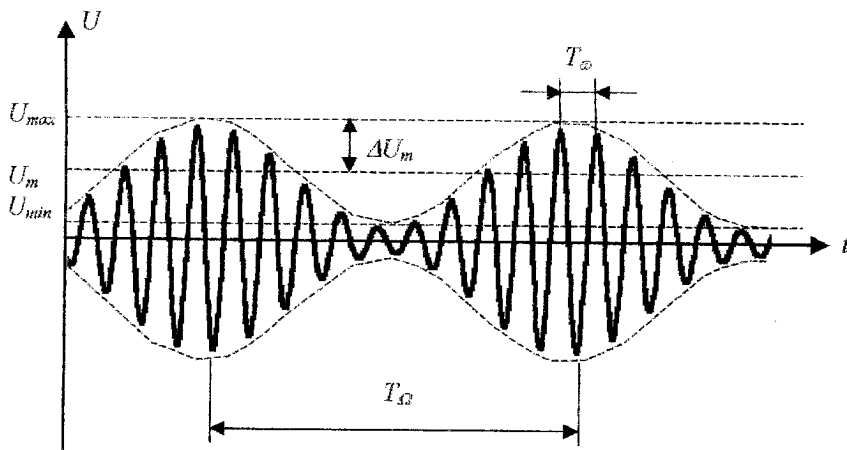


Рисунок 4.1

Нехай АМ-коливання (4.2) з глибиною модуляції M прикладене до послідовного контура. Контур налаштований на носійну частоту АМ-коливання, тобто $\omega_H = \omega_r$.

Спектральна діаграма вхідної напруги, а також частотні залежності модуля $Y(\omega)$ і аргумента $\phi(\omega)$ вхідної провідності контура (за умови, що носійна частота коливання збігається з резонансною частотою), зображені на рис.4.2, а і рис. 4.2, б.

Оскільки контур є системою лінійною, то струм, що виникає в колі також матиме три складових з частотами ω , $\omega + \Omega$, $\omega - \Omega$. Амплітуда струму носійної частоти дорівнює:

$$I_m = U_m \cdot Y(\omega_H) = U_m \cdot Y_H,$$

а його миттєве значення:

$$i_H(t) = U_m \cdot Y_H \cdot \cos(\omega_H \cdot t). \quad (4.3)$$

Оскільки частотна характеристика $Y(\omega)$ симетрична, то для бічних гармонік можна записати:

$$I_{m \text{ верх}} = I_{m \text{ ниж}} = \frac{1}{2} \cdot M \cdot U_m \cdot Y_b,$$

де $Y_b = \frac{Y_H}{\sqrt{1 + \left(2 \cdot Q \cdot \frac{\Omega}{\omega_H}\right)^2}}$ - модуль вхідної провідності при

розстроюванні $\Delta\omega = \pm\Omega$.

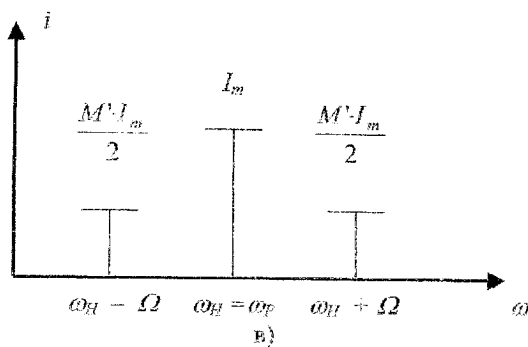
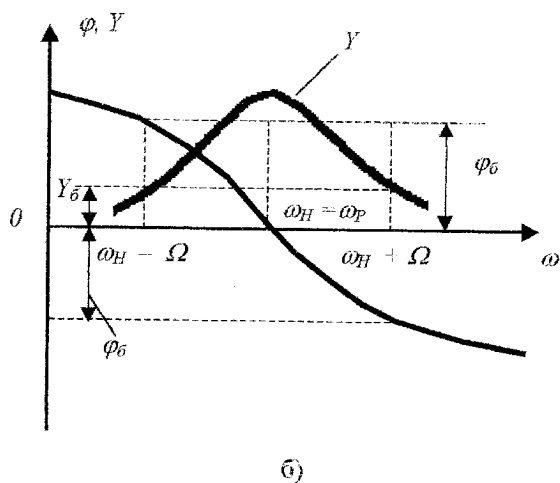
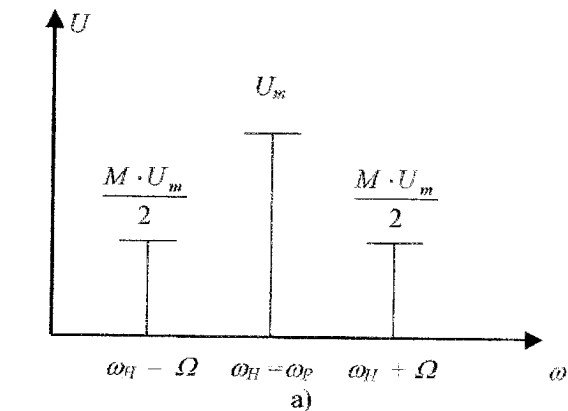


Рисунок 4.2

Фазові зсуви між бічними гармоніками напруги і струму дорівнюють:

$$\varphi_{U_D} = -\operatorname{arctg}\left(2 \cdot Q \cdot \frac{\Omega}{\omega_H}\right) = -\varphi_\delta;$$

$$\varphi_{I_H} = \operatorname{arctg}\left(2 \cdot Q \cdot \frac{\Omega}{\omega_H}\right) = \varphi_\delta.$$

Тому:

$$i_{\text{сепх}}(t) = \frac{1}{2} \cdot M \cdot U_m \cdot Y_\delta \cdot \cos[(\omega_H + \Omega) \cdot t - \varphi_\delta]; \quad (4.4)$$

$$i_{\text{нижн}}(t) = \frac{1}{2} \cdot M \cdot U_m \cdot Y_\delta \cdot \cos[(\omega_H - \Omega) \cdot t + \varphi_\delta].$$

Додавши (4.3) і (4.4), отримаємо:

$$i_{AM}(t) = I_m \cdot \cos(\omega_H \cdot t) + \frac{1}{2} \cdot M' \cdot I_m \cdot \cos[(\omega_H + \Omega) \cdot t - \varphi_\delta] + \frac{1}{2} \cdot M' \cdot I_m \cdot \cos[(\omega_H - \Omega) \cdot t + \varphi_\delta]. \quad (4.5)$$

З виразу (4.5), який за формою повністю збігається з (4.2), можна зробити висновок, що обвідна струму, як і обвідна вхідної напруги, змінюється за гармонічним законом.

$$i_{AM}(t) = I_m \cdot [1 + M' \cdot \cos(\Omega \cdot t - \varphi_\delta)] \cdot \cos(\omega_H \cdot t). \quad (4.6)$$

Коефіцієнт

$$M' = \frac{M}{\sqrt{1 + \left(2 \cdot Q \cdot \frac{\Omega}{\omega_H}\right)^2}} \quad (4.7)$$

в рівнянні (4.5) вказує на глибину модуляції струму в контурі. З виразу (4.7) видно, що $M' < M$, тобто глибина модуляції зменшилась. Чим вища добротність контура, тим менший M' в порівнянні з M .

Це явище носить назву демодуляції.

З формули (4.6) видно, що обвідна струму зсунута по фазі відносно обвідної напруги на кут φ_δ . Цей зсув зі збільшенням частоти модулювальних коливань прямує до $\frac{\pi}{2}$.

Спектральна діаграма струму в контурі зображена на рис.4.2, в. Графіки миттєвих значень $U_{AM}(t)$ та $i_{AM}(t)$ наведено на рис.4.3.

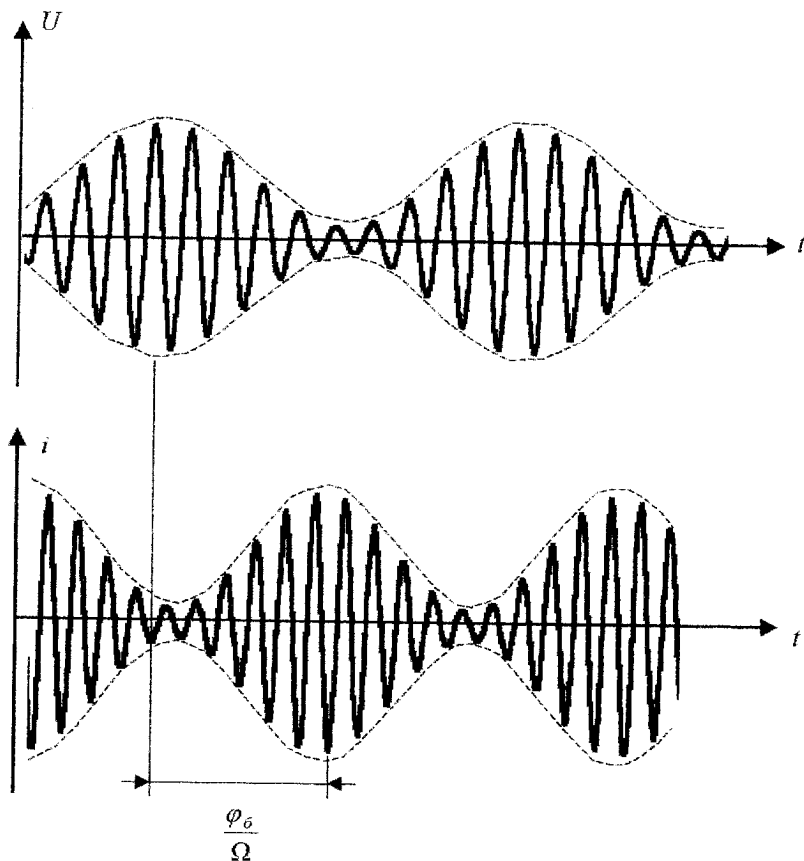


Рисунок 4.3

Спектральна діаграма струму в контурі зображена на рис.4.2, в. Графіки миттєвих значень $U_{AM}(t)$ та $i_{AM}(t)$ приведені на рис.4.3.

Якщо резонансна частота контура не збігається з носійною частотою ($\omega_p \neq \omega_H$), то з'являються спотворення модульованого сигналу, викликані порушенням амплітудних співвідношень між бічними складовими і складовою носійної частоти (рис.4.4).

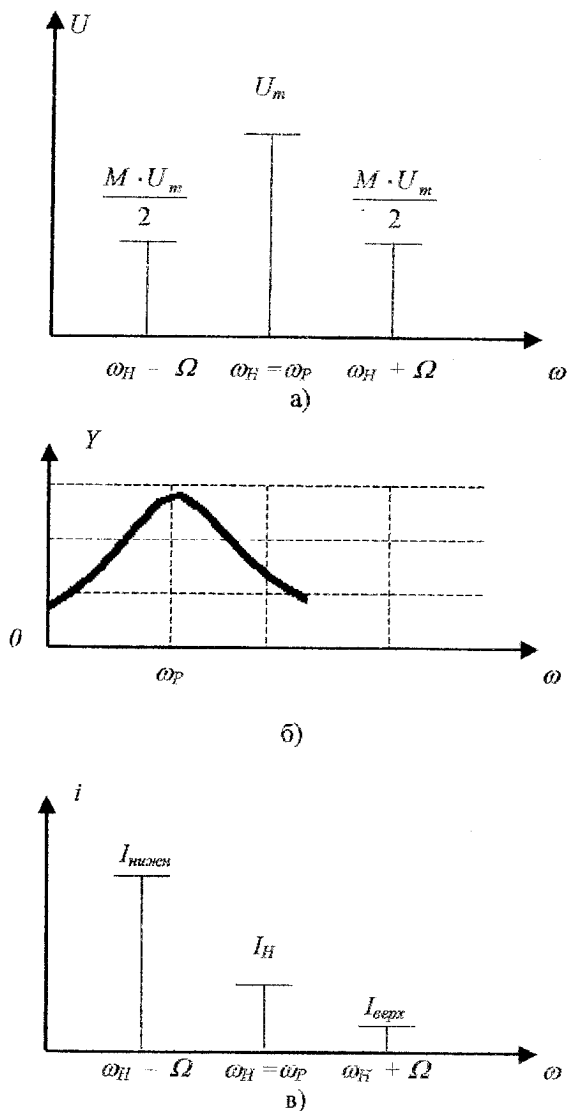


Рисунок 4.4

4.2 Домашнє завдання.

4.2.1 За допомогою моделювальної програми Electronics Workbench отримати модель АМ-коливання з $M=50\%$ подати його на послідовний контур з параметрами, що вказані на лабораторному макеті, і дослідити

вихідний АМ-сигнал при високій і низькій добротності контура ($R = 0$, $R = 39 \text{ Ом}$) (за умови $\omega_H = \omega_P$).

4.2.2 Те ж саме дослідження виконати при $\omega_H \neq \omega_P$.

4.3 Порядок виконання роботи.

4.3.1 Отримати АМ-коливання. Для цього зібрати схему рис.4.5

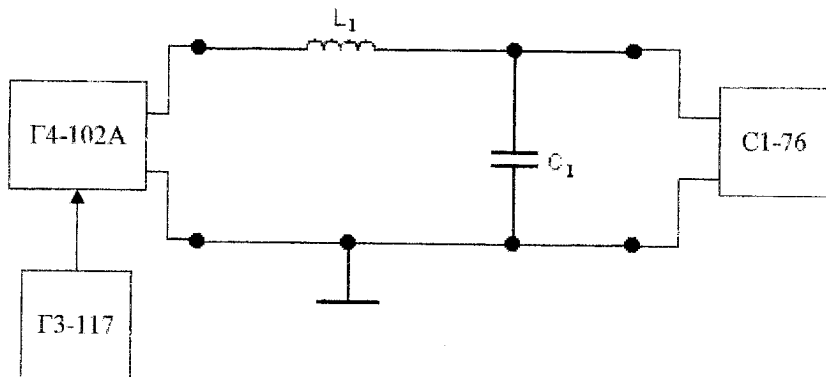


Рисунок 4.5.

і подати низькочастотну напругу з виходу генератора Г3-117 на вхід "Внеш. мод." генератора Г4-102А, встановивши глибину модуляції $M = 50\%$, і зарисувати осцилограму.

4.3.2 Подати на вхід контура (рис.4.5) АМ-коливання з носійною частотою, що дорівнює резонансній частоті контура, і модулювальною частотою F , послідовно встановлюючи її значення 1; 5; 10; 15; 20 кГц. Для кожної модулювальної частоти виміряти з осцилограми значення U_{\max} і U_{\min} , підтримуючи глибину модуляції сигналу на вході контура постійною ($M = 25 \dots 40\%$).

4.3.3 За отриманими значеннями розрахувати M' для всіх модулювальних частот. Результати експериментів і розрахунків занести до табл.4.1.

4.3.4 На одному графіку побудувати графік залежності коефіцієнта M' від частоти модуляції $F = \frac{\Omega}{2 \cdot \pi}$, розрахованого з використанням осцилограм та формули (4.7).

4.3.5 Подати на вхід контура АМ-коливання з носійною частотою $\omega_H \neq \omega_P$ (значення ω_H і F задає викладач), встановивши значення $M = 50\%$.

Зафіксувати вигляд осцилограми вихідної напруги і порівняти її з вхідним сигналом.

Таблиця 4.1

f , кГц	1	5	10	15	20
$U_{вих}$					
U_{min}					
M'					

4.4 Зміст звіту.

1. Короткі теоретичні відомості.
2. Розрахунки і моделі, виконані при підготовці до роботи.
3. Осцилограми АМ-коливань для різних F .
4. Розрахунки M' різними способами.
5. Схеми дослідів.
6. Таблиці і графіки.
7. Висновки.

4.5 Контрольні запитання.

1. Амплітудна модуляція.
2. Спектр амплітудно-модульованого коливання при тональній модуляції.
3. Коефіцієнт глибини модуляції.
4. Як визначити глибину модуляції АМ-коливання за осцилограмою?
5. Чим пояснити демодуляцію АМ-коливання при його проходженні через резонансну систему?
6. Як змінюється вихідний АМ-сигнал при проходженні його через послідовний коливальний контур при $\omega_H \neq \omega_F$?

5 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №7. ДОСЛІДЖЕННЯ ДИФЕРЕНЦІОВАЛЬНИХ ТА ІНТЕГРУВАЛЬНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ

Мета роботи – дослідження диференціальних і інтегральних кіл, визначення умов задовільного диференціювання та інтегрування.

5.1 Короткі теоретичні відомості

В сучасній радіоелектроніці широко застосовуються електричні кола, які здійснюють диференціювання та інтегрування вхідних напруг.

Розглянемо умови, при яких електричне коло (рис.5.1) буде виконувати операцію диференціювання.

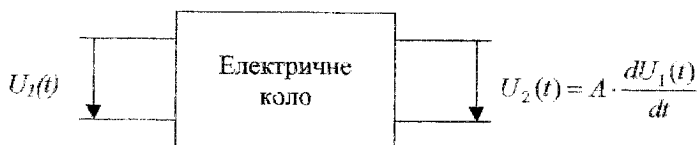


Рисунок 5.1

Аналіз кола проведемо з використанням перетворень Фур'є.
Вихідна напруга:

$$U_2(j\omega) = U_1(j\omega) \cdot K(j\omega),$$

де $U_2(j\omega)$ – спектральна густина вихідного сигналу;

$U_1(j\omega)$ – спектральна густина вхідного сигналу;

$K(j\omega)$ – комплексна передатна функція електричного кола.

Застосувавши зворотнє перетворення Фур'є, отримаємо:

$$U_2(t) = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} U_1(j\omega) \cdot K(j\omega) \cdot e^{j\omega t} d\omega. \quad (5.1)$$

Оскільки вихідна напруга має бути

$$U_2(t) = \frac{dU_1(t)}{dt},$$

то знаходимо

$$U_2(t) = A \cdot \frac{d}{dt} \left\{ \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} U_1(j\omega) \cdot e^{j\omega t} d\omega \right\} = \frac{A}{2 \cdot \pi} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} U_1(j\omega) \cdot e^{j\omega t} d\omega, \quad (5.2)$$

де A – коефіцієнт пропорційності.

З виразу (5.2) очевидно, що комплексна передатна функція диференціального кола:

$$K(j\omega) = j \cdot \omega \cdot A. \quad (5.3)$$

Розглянемо коло CR (рис.5.2, а)

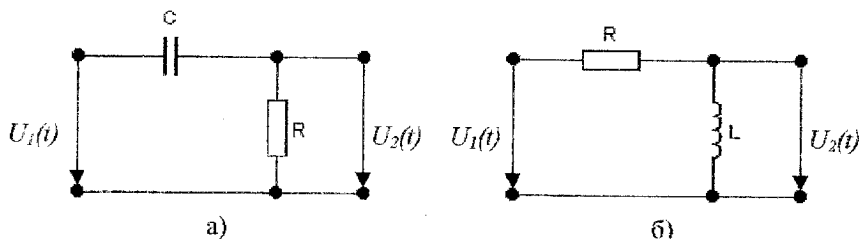


Рисунок 5.2

Комплексна передатна функція цього кола:

$$K(j\omega) = \frac{j \cdot \omega \cdot C \cdot R}{1 + j \cdot \omega \cdot C \cdot R}. \quad \checkmark \quad (5.4)$$

За умови:

$$\omega \cdot C \cdot R \ll 1 \quad (5.5)$$

передатна функція кола (рис.5.2, а)

$$K(j\omega) = j \cdot \omega \cdot C \cdot R = j \cdot \omega \cdot A$$

збігається з виразом (5.3), а це дозволяє стверджувати, що коло (рис.5.2, а) є диференціувальним.

подамо на вхід кола (рис.5.2, а) напругу $U_1(t)$. За другим законом Кірхгофа:

$$U_1(t) = U_2(t) + U_C(t) = i(t) \cdot R + U_C(t). \quad (5.6)$$

Враховуючи, що:

$$i(t) = C \cdot \frac{dU_C}{dt},$$

вираз (5.6) приймає такий вигляд:

$$U_1(t) = R \cdot C \cdot \frac{dU_C(t)}{dt} + U_C(t). \quad (5.7)$$

Характеристичне рівняння, що відповідає диференціальному рівнянню (5.7):

$$p \cdot C \cdot R + 1 = 0. \quad (5.8)$$

Корінь характеристичного рівняння

$$p = -\frac{1}{R \cdot C} = -\frac{1}{\tau},$$

де τ - постійна часу кола.

Розв'язок рівняння (5.7) є сумою примусової і вільної складових

$$U_C(t) = U_{Cnp} + U_{Cвн} = \frac{U_1(t) \cdot R}{Z} + A \cdot e^{p \cdot t}, \quad (5.9)$$

де Z - повний опір кола;

A - постійна інтегрування.

Нехай $U_1(t)$ - відеоімпульс прямокутної форми (рис.5.3)

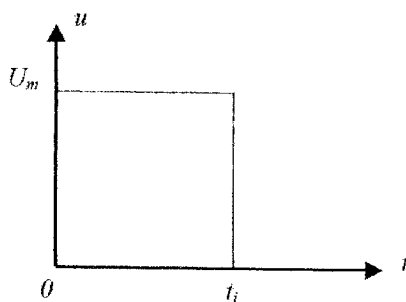


Рисунок 5.3

Проаналізуємо напругу на виході кола, розбивши час аналізу на два проміжки:

а) $0 < t < t_i$, $U_1(t) = U_m$, $U_{Cnp}(t) = U_m$, $U_C(0) = 0$, $A = -U_m$

$$U_C(t) = U_m + A \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (5.10)$$

Напруга на ємності для цього проміжку часу

$$U_C(t) = U_m - U_m \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (5.11)$$

Струм в колі

$$i(t) = C \cdot \frac{dU_C(t)}{dt} = \frac{C \cdot U_m}{\tau} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (5.12)$$

а напруга на виході

$$U_2(t) = i(t) \cdot R = \frac{U_m \cdot R \cdot C}{\tau} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} = U_m \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (5.13)$$

Графік вихідної напруги зображено на рис.5.4.

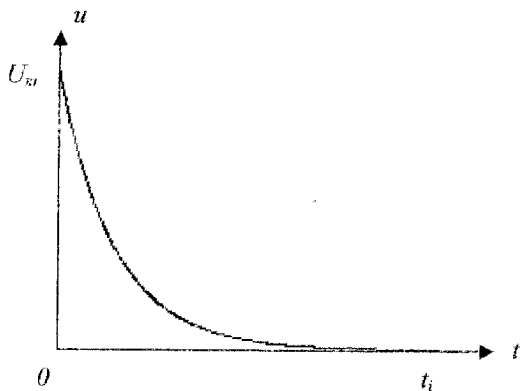


Рисунок 5.4

б) $t_i < t < \infty$, $U_1(t) = 0$, $U_{C_{np}}(t) = 0$, $U_C(0) = U_m$, $A = U_m$

$$U_C(t) = A \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (5.14)$$

Напруга на ємності для цього проміжку часу

$$U_C(t) = U_m \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (5.15)$$

Струм в колі

$$i_R(t) = C \cdot \frac{dU_C(t)}{dt} = -C \cdot \frac{U_m}{\tau} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (5.16)$$

а напруга на виході

$$U_2(t) = i_R(t) \cdot R = -\frac{U_m \cdot R \cdot C}{\tau} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} = -U_m \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (5.17)$$

Графік вихідної напруги зображено на рис. 5.5.

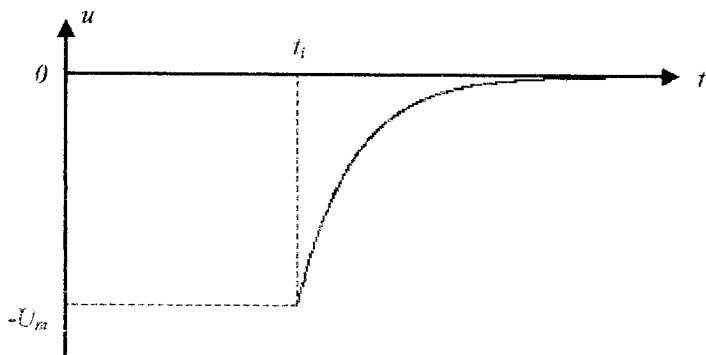


Рисунок 5.5

Сумарна напруга (рис.5.6):

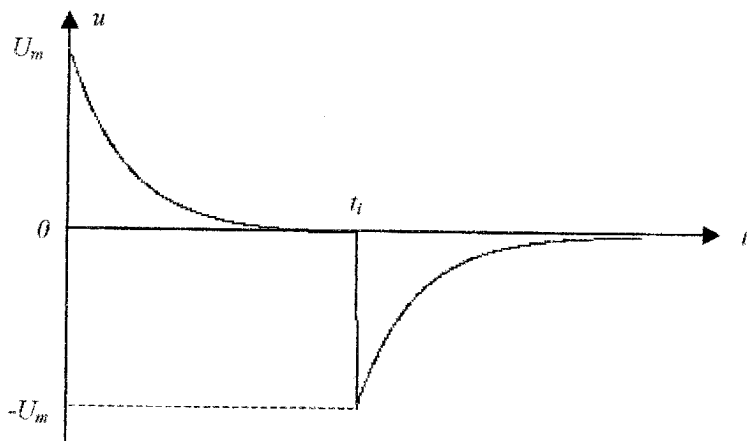


Рисунок 5.6

Розглянемо коло RL (рис.5.2, б). Його комплексна передатна функція:

$$K(j\omega) = \frac{j \cdot \omega \cdot L}{R + j \cdot \omega \cdot L} = \frac{j \cdot \omega \cdot \frac{L}{R}}{1 + j \cdot \omega \cdot \frac{L}{R}} = \frac{j \cdot \omega \cdot \tau}{1 + j \cdot \omega \cdot \tau}, \quad (5.18)$$

де $\tau = \frac{L}{R}$ - постійна часу кола.

За умови $\omega \cdot \tau \ll 1$ вираз (5.18) спрощується:

$$K(j\omega) = j \cdot \omega \cdot \frac{L}{R} = j \cdot \omega \cdot A. \quad (5.19)$$

З виразу (5.19) очевидно, що коло RL є також диференціальним. Диференціальне рівняння для цього випадку буде таким:

$$U_1(t) = i(t) \cdot R + L \cdot \frac{U(t)}{dt}, \quad (5.20)$$

а характеристичне рівняння

$$p \cdot L + R = 0. \quad (5.21)$$

Корінь характеристичного рівняння

$$p = -\frac{R}{L}. \quad (5.22)$$

Перехідний струм в загальному вигляді:

$$i(t) = i_{np} + i_{свл} = \frac{U_1(t)}{Z} + A \cdot e^{\frac{t}{\tau}}. \quad (5.23)$$

Нехай, як і в попередньому випадку, $U_1(t)$ – відеоімпульс прямокутної форми (рис.5.3).

Проаналізуємо, якою буде напруга на виході кола:

$$\text{а) } 0 < t < t_i, \quad U_1(t) = U_m, \quad i_{np}(t) = \frac{U_m}{R}, \quad i(0) = 0, \quad A = -\frac{U_m}{R}$$

$$i(t) = \frac{U_m}{R} + A \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} = \frac{U_m}{R} - \frac{U_m}{R} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}},$$

$$U_2(t) = L \cdot \frac{di(t)}{dt} = L \cdot \frac{U_m}{R \cdot \tau} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} = U_m \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (5.24)$$

У відповідності до виразу (5.24) графік вихідної напруги (рис.5.4).

$$\text{б) } t_i < t < \infty, \quad U_1(t) = 0, \quad i_{np}(t) = 0, \quad i(0) = \frac{U_m}{R}, \quad A = \frac{U_m}{R}$$

$$i(t) = A \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} = \frac{U_m}{R} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}},$$

$$U_2(t) = L \cdot \frac{di(t)}{dt} = -\frac{U_m \cdot L}{R \cdot \tau} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} = -U_m \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (5.25)$$

Графік вихідної напруги за виразом (5.25) показаний на рис.5.5, а сумарна напруга – на рис.5.6.

Умовою задовільного диференціювання будуть співвідношення:

$$\omega \cdot \tau \ll 1, \quad \tau \ll t_i. \quad (5.26)$$

Розглянемо умови, за яких коло (рис.5.7) буде виконувати операцію інтегрування.

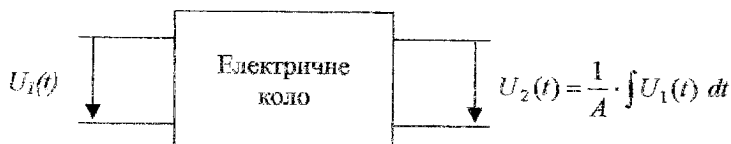


Рисунок 5.7

$$U_2(j\omega) = U_1(j\omega) \cdot K(j\omega); \quad U_2(t) = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \int U_1(j\omega) \cdot K(j\omega) \cdot e^{-j\omega t} d\omega;$$

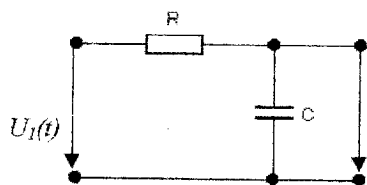
$$U_2(t) = \int U_1(t) dt = \frac{1}{A} \cdot \int \left\{ \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} U_1(j\omega) \cdot e^{j\omega t} d\omega \right\} dt =$$

$$= \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} U_1(j\omega) \cdot \frac{1}{j \cdot \omega \cdot A} \cdot e^{j\omega t} d\omega. \quad (5.27)$$

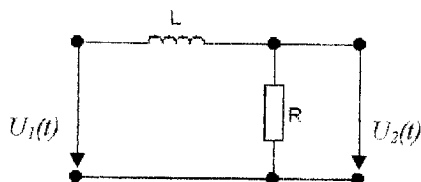
З виразу (5.27) видно, що комплексна передатна функція інтегрувального кола

$$K(j\omega) = \frac{1}{j \cdot \omega \cdot A}. \quad (5.28)$$

Розглянемо коло RC (рис.5.8, а)



а)



б)

Рисунок 5.8

Комплексна передатна функція цього кола:

$$K(j\omega) = \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C} \cdot \frac{1}{R + \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C}} = \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C} \cdot \frac{j \cdot \omega \cdot C}{j \cdot \omega \cdot C \cdot R + 1} =$$

$$= \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C \cdot R + 1} = \frac{1}{j \cdot \omega \cdot \tau + 1}. \quad (5.29)$$

При умові, що $\omega \cdot C \cdot R \gg 1$, комплексна передатна функція спрощується

$$K(j\omega) = \frac{1}{j \cdot \omega \cdot \tau} = \frac{1}{j \cdot \omega \cdot A}. \quad (5.30)$$

Порівнюючи вирази (5.30) і (5.28), можна стверджувати, що RC-коло є інтегрувальним колом.

Проаналізуємо вплив кола на відеоімпульс прямокутної форми (рис.5.3), скориставшись виразами (5.11) і (5.15)

а) $0 < t < t_b$

$$U_c(t) = U_m - U_m \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (5.31)$$

Графік вихідної напруги на цьому проміжку:

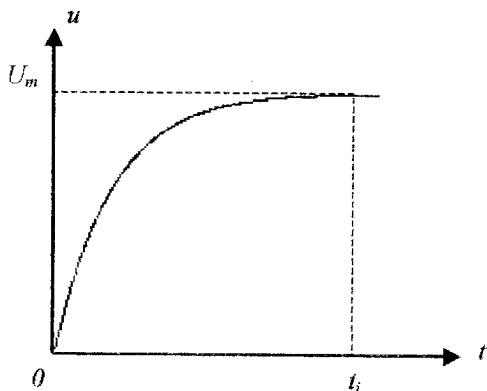


Рисунок 5.9

б) $t_i < t < \infty$,

$$U_c(t) = U_m \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (5.32)$$

Графік вихідної напруги для цього проміжку:

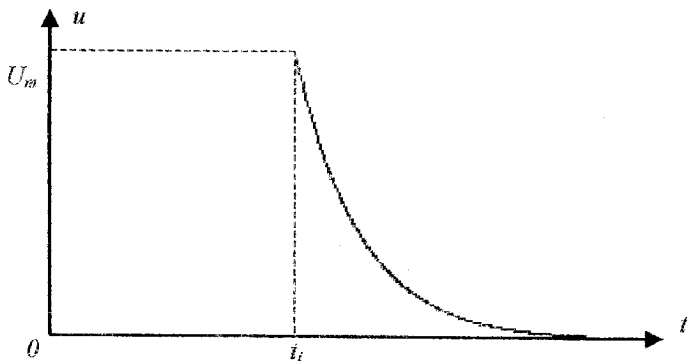


Рисунок 5.10

Сумарна напруга на проміжку $0 < t < \infty$

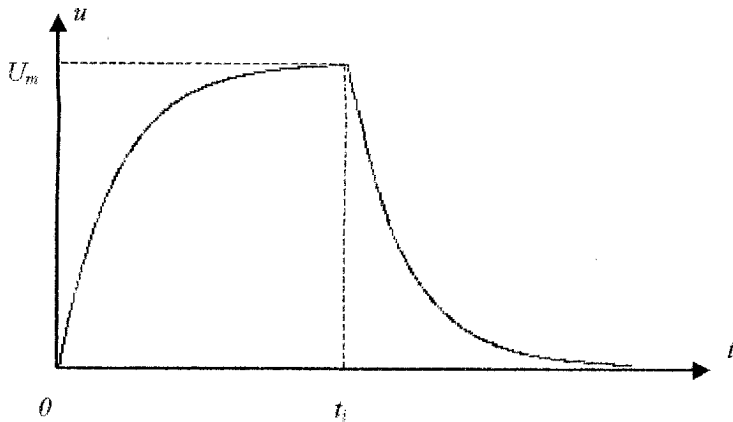


Рисунок 5.11

Розглянемо коло LR (рис.5.8, б). Комплексна передатна функція цього кола:

$$K(j\omega) = \frac{R}{R + j \cdot \omega \cdot L} = \frac{1}{1 + j \cdot \omega \cdot \frac{L}{R}} = \frac{1}{j \cdot \omega \cdot \tau} \quad (5.33)$$

За умови $\omega \cdot \tau \gg 1$ матимемо

$$K(j\omega) = \frac{1}{j \cdot \omega \cdot \tau} = \frac{1}{j \cdot \omega \cdot A} \quad (5.34)$$

Вираз (5.32) повністю збігається з (5.28), тому коло LR є також інтегровальним і для нього можна записати вираз, скориставшись попереднім аналізом:

а) $0 < t < t_i$,

$$i(t) = \frac{U_m}{R} - \frac{U_m}{R} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}; \quad U_2(t) = U_m - U_m \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (5.35)$$

б) $t_i < t < \infty$,

$$i(t) = \frac{U_m}{R} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}; \quad U_2(t) = U_m \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (5.36)$$

Вирази (5.35) і (5.36) повністю збігаються з виразами (5.31) і (5.32) відповідно, тому графічно вихідна напруга LR-кола повторюватиме рис.5.11.

Умовою задовільного диференціювання будуть співвідношення:

$$\omega \cdot \tau \gg 1, \tau \gg t_i. \quad (5.37)$$

5.2 Домашнє завдання.

5.2.1 Вивчити розділ “Диференціювання та інтегрування сигналів”.

5.2.2 Розрахувати частоти періодичної послідовності прямокутних відеоімпульсів для задовільного інтегрування і диференціювання.

5.2.3 За допомогою моделювальної програми Electronics Workbench виконати моделювання вихідної напруги інтегровального і диференціального кіл для таких випадків:

- інтегровальне коло: а) $\omega \cdot \tau < 1$; б) $\omega \cdot \tau = 1$; в) $\omega \cdot \tau > 1$; г) $\omega \cdot \tau \gg 1$;
- диференціальне коло: а) $\omega \cdot \tau < 1$; б) $\omega \cdot \tau = 1$; в) $\omega \cdot \tau > 1$;
- г) $\omega \cdot \tau \gg 1$;

5.2.4 Результати моделювання подати у вигляді графіків.

5.3 Порядок виконання роботи.

5.3.1 Ознайомитись зі схемою лабораторного макета (рис.5.12).

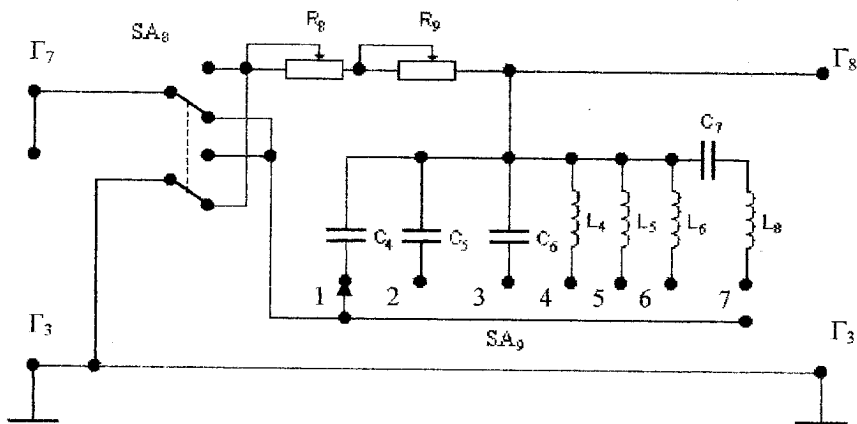


Рисунок 5.12

5.3.2 Дослідити CR-коло, для чого перемикач SA_8 перемкнути в нижнє положення, на вхід кола (Γ_7, Γ_3) подати періодичну послідовність додатніх відеоімпульсів прямокутної форми від генератора Г5-54, вибравши за допомогою змінних опорів R_8 і R_9 та перемикача SA_9 такі умови: а) $\tau < t_i$; б) $\tau = t_i$; в) $\tau > t_i$; г) $\tau \gg t_i$. Осцилограф С1-76 під'єднати до гнізд (Γ_8, Γ_3).

5.3.3 Дослідити RC-коло, для чого перемикач SA_8 перемкнути в верхнє положення, за допомогою змінних опорів R_8 і R_9 та перемикача SA_9

задати такі умови: а) $\tau < t_i$; б) $\tau = t_i$; в) $\tau > t_i$; г) $\tau \gg t_i$.

5.3.4 Дослідити LR-коло, для чого перемикач SA_8 перемкнути в нижнє положення, за допомогою змінних опорів R_8 і R_9 та перемикача SA_9 задати умови п.5.3.3.

5.3.5 Дослідити RL-коло, для чого перемикач SA_8 перемкнути в верхнє положення, за допомогою змінних опорів R_8 і R_9 та перемикача SA_9 задати умови п.5.3.2.

5.3.6 Для всіх досліджуваних схем зарисувати осцилограми вихідних імпульсних сигналів.

5.4 Склад звіту:

- короткі теоретичні відомості;
- розрахунки та графіки, отримані при підготовці до заняття;
- осцилограми вихідних сигналів;
- схеми досліджуваних кіл;
- висновки.

5.5 Контрольні запитання.

1. Передатна функція диференціовального кола.
2. Передатна функція інтегровального кола.
3. Яку математичну операцію виконує RC-коло?
4. Яку математичну операцію виконує CR-коло?
5. Яку математичну операцію виконує LR-коло?
6. Яку математичну операцію виконує RL-коло?
7. Графіки вихідної напруги інтегровального і диференціовального кіл для випадків задовільного інтегрування і диференціювання при дії на вході періодичної послідовності прямокутних відеоімпульсів.

6 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №8. ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ПАСИВНИХ ЧОТИРИПОЛЮСНИКІВ

Мета роботи – експериментальне визначення параметрів Т- і П-подібних чотирьохполосників і використання їх при побудові схем заміщення.

6.1 Короткі теоретичні відомості.

Чотирьохполосником називається електрична схема, що має два вхідних і два вихідних затискачі (полюси). Такі пристрої, як підсилювач, фільтр, мостова схема і т. і. можна вважати чотирьохполосниками.

Чотирьохполосник зображається у вигляді прямокутника, з якого виходять полюси mn і pq (рис. 6.1).

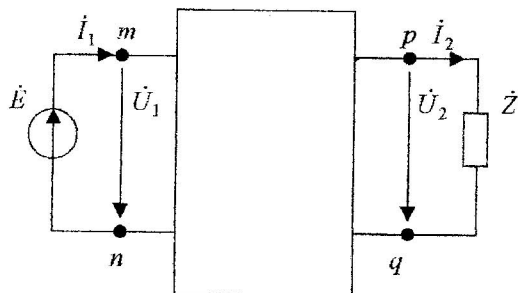


Рисунок 6.1

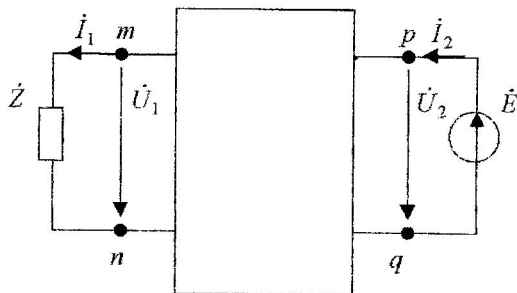


Рисунок 6.2

Якщо чотирьохполосник має джерела електричної енергії, він називається активним, в іншому випадку – пасивним. До вхідних

затискачів m під'єднується джерело енергії, до вихідних pq – навантаження. Пасивний лінійний чотириполосник складається тільки з елементів R, L, C .

Якщо під'єднати до чотириполосника джерело синусоїдної ЕРС і вибрати позитивні напрямки напруг та струмів згідно з рис.8.1, то можна записати

$$\dot{U}_1 = \dot{A} \cdot \dot{U}_2 + \dot{B} \cdot \dot{I}_2; \quad \dot{I}_1 = \dot{C} \cdot \dot{U}_2 + \dot{D} \cdot \dot{I}_2. \quad (6.1)$$

Вирази (6.1) є основними рівняннями пасивного чотириполосника.

Комплексні коефіцієнти $\dot{A}, \dot{B}, \dot{C}, \dot{D}$ залежать від схеми внутрішніх з'єднань чотириполосника і називаються "A"-параметрами чотириполосника.

Параметри \dot{A} і \dot{D} безрозмірні, \dot{B} вимірюється в омах, \dot{C} – в сименсах. В оборотному чотириполоснику вони пов'язані між собою співвідношенням

$$\dot{A} \cdot \dot{D} - \dot{B} \cdot \dot{C} = 1,$$

тому тільки три з них незалежні.

Якщо змінити ввімкнення чотириполосника на обернене (рис.6.2), то порівняно з рівняннями (6.1), параметри \dot{A} і \dot{D} в нових рівняннях міняються місцями:

$$\dot{U}_2 = \dot{D} \cdot \dot{U}_1 + \dot{B} \cdot \dot{I}_1; \quad \dot{I}_2 = \dot{C} \cdot \dot{U}_1 + \dot{A} \cdot \dot{I}_1. \quad (6.2)$$

Будь-який чотириполосник можна замінити еквівалентним, що має такі ж самі параметри $\dot{A}, \dot{B}, \dot{C}, \dot{D}$. Найпростіший еквівалентний чотириполосник в загальному випадку може мати три елементи (за числом незалежних параметрів).

Таким чином, будь-який чотириполосник з відомими параметрами може бути замінений будь-яким з двох еквівалентних йому чотириполосників:

а) T – подібним, елементи якого з'єднані зіркою (рис.6.3):

$$Z_1 = \frac{\dot{A}-1}{\dot{C}}; \quad Z_2 = \frac{\dot{D}-1}{\dot{C}}; \quad Z_3 = \frac{1}{\dot{C}}. \quad (6.3)$$

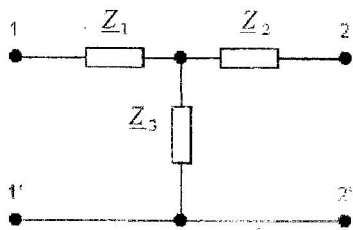


Рисунок 6.3

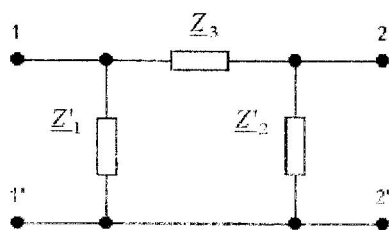


Рисунок 6.4

б) П – подібним, елементи якого з'єднані трикутником (рис.6.4):

$$\underline{Z}_1 = \frac{\dot{B}-1}{\dot{D}}; \quad \underline{Z}_2 = \frac{\dot{B}-1}{\dot{A}}; \quad \underline{Z}_3 = \dot{B}. \quad (6.4)$$

Для визначення параметрів чотириполюсників дослідним шляхом використовують досліди холостого ходу (ХХ) і короткого замикання (КЗ):

1) дослід холостого ходу ($\dot{I}_2 = 0$). З рівнянь (6.1) знаходимо:

$$\dot{A} = \frac{\dot{U}_{1xx}}{\dot{U}_{2xx}}, \quad C = \frac{\dot{I}_{1xx}}{\dot{U}_{2xx}}; \quad (6.5)$$

2) дослід короткого замикання ($\dot{U}_2 = 0$)

$$\dot{B} = \frac{\dot{U}_{1кз}}{\dot{I}_{2кз}}, \quad \dot{D} = \frac{\dot{I}_{1кз}}{\dot{I}_{2кз}}. \quad (6.6)$$

Оборотність чотириполюсника можна перевірити за формулою:

$$\dot{A} \cdot \dot{D} - \dot{B} \cdot \dot{C} = 1.$$

Для характеристики будь-якого чотириполюсника можна використати вторинні параметри:

- характеристичний опір при прямому ввімкненні

$$\underline{Z}_{x1} = \sqrt{\frac{\dot{A} \cdot \dot{B}}{\dot{C} \cdot \dot{D}}};$$

- характеристичний опір при оберненому (зворотному) ввімкненні

$$\underline{Z}_{x2} = \sqrt{\frac{\dot{D} \cdot \dot{B}}{\dot{A} \cdot \dot{C}}};$$

- коефіцієнт розповсюдження (міра передачі) чотириполюсника \dot{G} .

Коефіцієнт розповсюдження \dot{G} характеризує передачу енергії через чотириполюсник в обох напрямках і дорівнює

$$\dot{G} = \frac{1}{2} \cdot \ln \left(\frac{\dot{U}_1 \cdot \dot{I}_1}{\dot{U}_2 \cdot \dot{I}_2} \right)$$

при узгодженому ввімкненні чотириполюсника. Його залежність від первинних параметрів виражається формулою

$$\dot{G} = \ln \left(\sqrt{\dot{A} \cdot \dot{D}} + \sqrt{\dot{B} \cdot \dot{C}} \right). \quad (6.7)$$

Як і всі інші параметри, \dot{G} – комплексна величина, тобто $\dot{G} = a + j \cdot b$. Дійсна її частина a є коефіцієнтом згасання чотириполюсника і характеризує зменшення амплітуд напруги і струму на виході, уявна частина b є коефіцієнтом фази і відображає зміну фазового зсуву між напругою і струмом на виході.

6.3 Порядок виконання роботи.

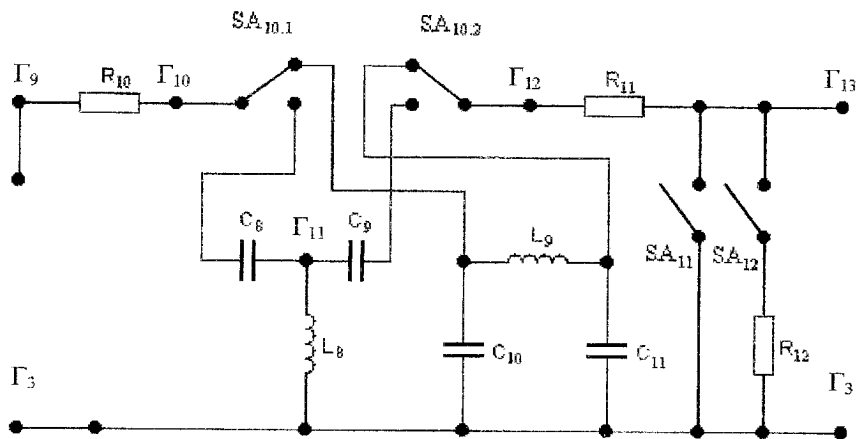


Рисунок 6.5 - Схема лабораторного макета.

6.2.1 Дослідження Т-подібного чотириполюсника.

6.2.1.1 Зібрати схему (рис.6.6, а), під'єднати для дослідження Т-подібний чотириполюсник в режимі холостого ходу (U_1, f – задаються).

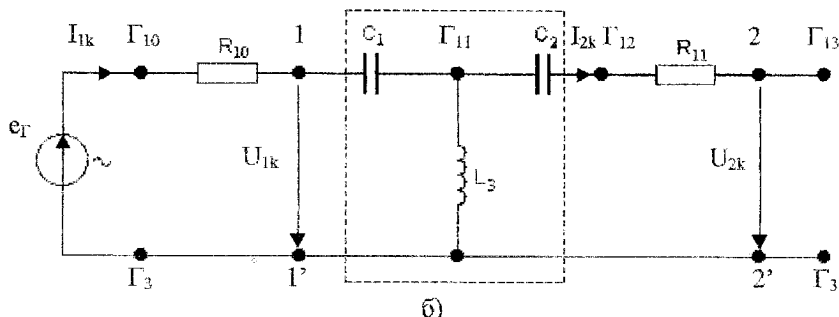
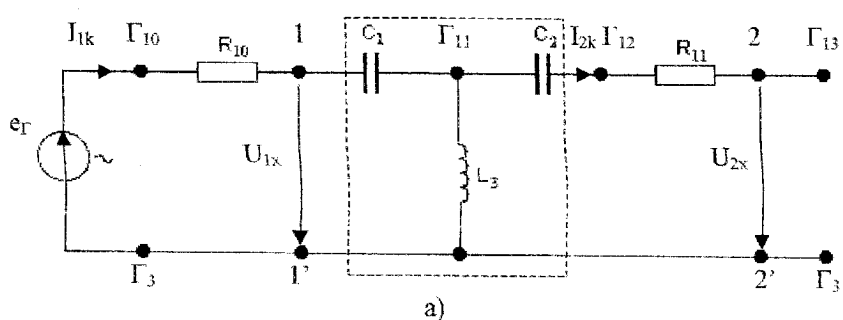


Рисунок 6.6

6.2.1.2 Виміряти напруги на елементах R_{10} , C_1 , L_3 , U_{1xx} . Отримані результати занести до табл.6.1.

Таблиця 6.1

Експериментальні дані							Результати розрахунків						
U_{1xx}	U_{R10}	U_{C1}	ψ_{C1}	U_{L3}	ψ_{L3}	I_1	ψ_{I1}	Z_1	ψ_{Z1}	Z_3	ψ_{Z3}	C_1	L_3

6.2.1.3 Користуючись діаграмами (рис.6.7) виміряти початкові фази φ_{C1} , φ_{L3} , φ_{I1} (випадок $U_{L3} > U_{C1}$), зважаючи, що $I_{1x} = \frac{U_{R10}}{R_{10}}$.

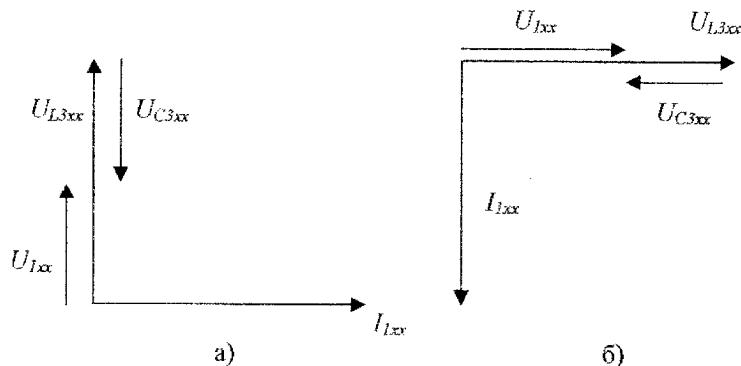


Рисунок 6.7

З яких визначаємо:

$$\dot{U}_{1xx} = U_{1xx}; \quad \dot{U}_{Z1xx} = U_{Z1xx} \cdot e^{j180^\circ}; \quad \dot{U}_{Z3xx} = U_{Z3xx} = U_{2xx}; \quad \dot{I}_{1xx} = I_{1xx} \cdot e^{-j90^\circ}.$$

Отримані значення заносимо до табл.6.1.

6.2.1.4 Розрахувати значення комплексних опорів Z_1 і Z_3 , та знайти значення елементів C_1 і L_3 . Розраховані значення занести до табл.6.1.

$$\underline{Z}_1 = \frac{\dot{U}_{C1xx}}{\dot{I}_{1xx}}; \quad \underline{Z}_3 = \frac{\dot{U}_{L3xx}}{\dot{I}_{1xx}}.$$

6.2.1.5 Зібрати схему (рис.6.6, б) чотириполосника, що працює в режимі короткого замикання.

6.2.1.6 Виміряти напруги на елементах R_{10} , C_1 , L_3 , C_2 , R_{11} . Отримані результати занести до табл.6.2, враховуючи, що $I_2 = \frac{U_{R_{11}}}{R_{11}}$.

Таблиця 6.2

Експериментальні дані												Результати розрахунку		
U_{1k}	$U_{R_{10}}$	U_{C_1}	U_{L_3}	U_{C_2}	I_1	ψ_{i1}	I_{L_3}	ψ_{L_3}	I_2	ψ_{i2}	$U_{R_{11}}$	Z_2	ψ_{Z_2}	C_2

6.2.1.7 Користуючись побудованою діаграмою (рис.6.8) виміряти початкові фази ψ_{i1} , ψ_{L_3} , ψ_{i2} ($I_{C_{3k3}} > I_{2k}$).

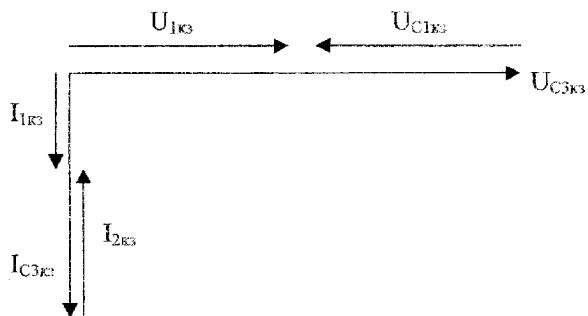


Рисунок 6.8

З діаграми також отримуємо:

$$\dot{U}_{L_{3k}} = U_{L_{3k}}; \quad \dot{I}_{1k} = I_{1k} \cdot e^{-j90^\circ}; \quad \dot{I}_{2k} = I_{2k} \cdot e^{j90^\circ}.$$

Струм I_{L_3} дорівнює:

$$I_{L_3} = \frac{U_{L_{3k}}}{X_3}.$$

Одержані струми та їх початкові фази заносимо до табл.6.2.

6.2.1.8 Розрахувати значення комплексного опору Z_2 і значення C_2 .

Отримані значення занести до табл.6.2.

6.2.2 Дослідження П-подібного чотириполюсника.

6.2.2.1 Зібрати схему (рис.6.9, а) II-подібного чотириполосника, що працює в режимі холостого ходу (вхідна напруга і частота такі ж, як і в попередньому досліді).

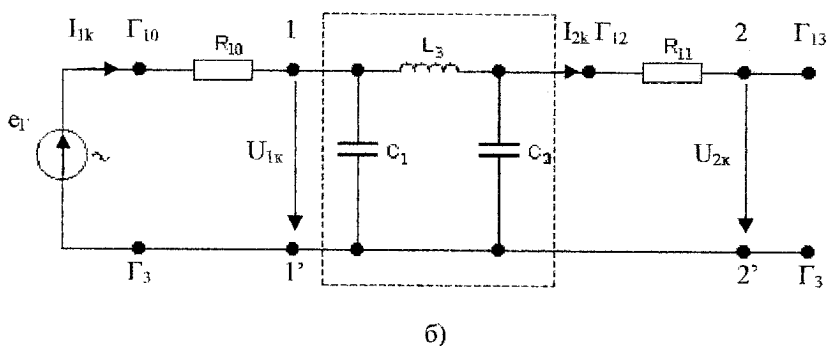
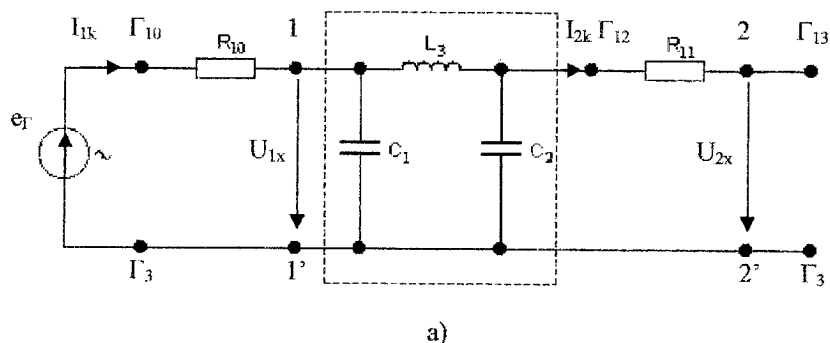


Рисунок 6.9

6.2.2.2 Виміряти напруги на елементах R_{10} , L_3 , C_2 та напругу U_{1x} . Отримані результати занести до табл.6.3.

Таблиця 6.3

U_{1x}	I_1	ψ_{I1}	U_2	ψ_{U2}

6.2.2.3 Користуючись діаграмою (рис.6.10, а) знаходимо початкові фази ψ_{I1} , ψ_{U2} ($I_{C1}, I_{C2} > I_{L3}$) та заносимо до табл.6.3.

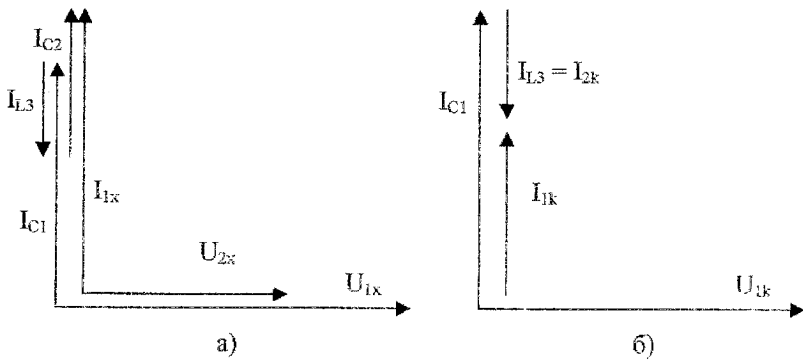


Рисунок 6.10

6.2.2.4 Зібрати схему (рис.6.9, б) П-подібного чотириполосника, що працює в режимі короткого замикання.

6.2.2.5 Виміряти напруги на елементах R_{10} , L_3 , R_{11} та напругу U_{1k} . Отримані результати занести до табл.6.4.

Таблиця 6.4

U_{1k}	I_{1k}	ψ_{1k}	I_{2k}	ψ_{2k}

6.2.2.6 Скориставшись діаграмою (рис.6.10, б) знайти початкові фази ψ_{1k} , ψ_{2k} ($I_{C1} > I_{L3}$) та занести їх значення до табл.6.4.

6.2.3 За даними табл.6.1 – 6.4 знайти А-параметри Т-подібного та П-подібного чотириполосників.

6.2.4 Користуючись знайденими значеннями А-параметрів визначити вторинні параметри досліджуваних чотириполосників, дослідити рівняння зв'язку.

6.2.5 Під'єднавши до чотириполосників R_{12} виміряти струм I_2 та напругу U_2 , визначити опір навантаження та вхідний опір зі сторони полюсів 1, 1'.

6.2.6 За відомими А-параметрами розрахувати еквівалентні опори Т-і П-подібних чотириполосників.

6.3 Склад звіту:

- короткі теоретичні відомості;
- розрахунки параметрів чотириполосників, діаграми;
- схеми досліджень, таблиці вимірів;
- висновки за результатами досліджень.

6.4 Контрольні запитання.

1. Визначення чотириполосника.
2. Якими параметрами характеризується чотириполосник?
3. Співвідношення між первинними параметрами чотириполосника.
4. Як експериментально визначити первинні параметри чотириполосника?
5. Вторинні параметри чотириполосника.
6. Знайти A-параметри простого чотириполосника.
7. Визначити Z, Y, H, G – параметри за відомими A-параметрами.

7 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №9. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ФІЛЬТРІВ

Мета роботи – ознайомлення з фільтруючими властивостями електричних кіл, дослідження електричних фільтрів нижніх, верхніх частот, загороджувального та смугового фільтра.

7.1 Короткі теоретичні відомості.

Електричний фільтр – це пристрій, який дозволяє виділити зі складного сигналу складові з певними частотами.

Фільтром може бути чотириполосник, що пропускає деяку смугу частот з малим згасанням. Поза цією смугою згасання велике.

Смуга частот, в якій згасання незначне, називається смугою пропускання (смугою прозорості) фільтра. Смуга частот, в якій згасання велике, називається смугою затримування (непрозорості) фільтра.

Згасання визначається в логарифмічних одиницях - децибелах:

$$a = 20 \cdot \lg \left(\frac{U_1}{U_2} \right), \quad (7.1)$$

де U_1 – напруга сигналу на вході фільтра;

U_2 – напруга сигналу на виході фільтра.

Частоту, яка розділяє смугу пропускання і смугу затримування, називають частотою зрізу фільтра.

Частотні властивості фільтрів характеризуються амплітудно-частотною характеристикою. За частотною ознакою розрізняють фільтри нижніх частот (ФНЧ) (рис.7.1, а), фільтри верхніх частот (ФВЧ) (рис.7.1, б), смугові фільтри (СФ) (рис.7.1, в) та загороджувальні фільтри (ЗФ) (рис.7.1, г).

Складність фільтра визначається його порядком n , який чисельно дорівнює кількості полюсів операторної передатної функції фільтра. При цьому кількість реактивних елементів фільтра не може бути меншою n .

Фільтри можуть бути пасивними і активними. Пасивні – це фільтри складені тільки з пасивних елементів R , L , C . Активні фільтри окрім пасивних елементів мають в своєму складі активні електронні прилади - транзистори, операційні підсилювачі або спеціальні пристрої (гіратори, інвертори опорів, тощо).

За елементами, використаними для побудови фільтрів, розрізняють електричні, п'єзоелектричні та електромеханічні фільтри. В електричних фільтрах використовують електричні елементи R , L , C та електронні прилади; в п'єзоелектричних фільтрах – електромеханічні резонатори із матеріалів, що мають п'єзоелектричні властивості, - кварцеві кристали

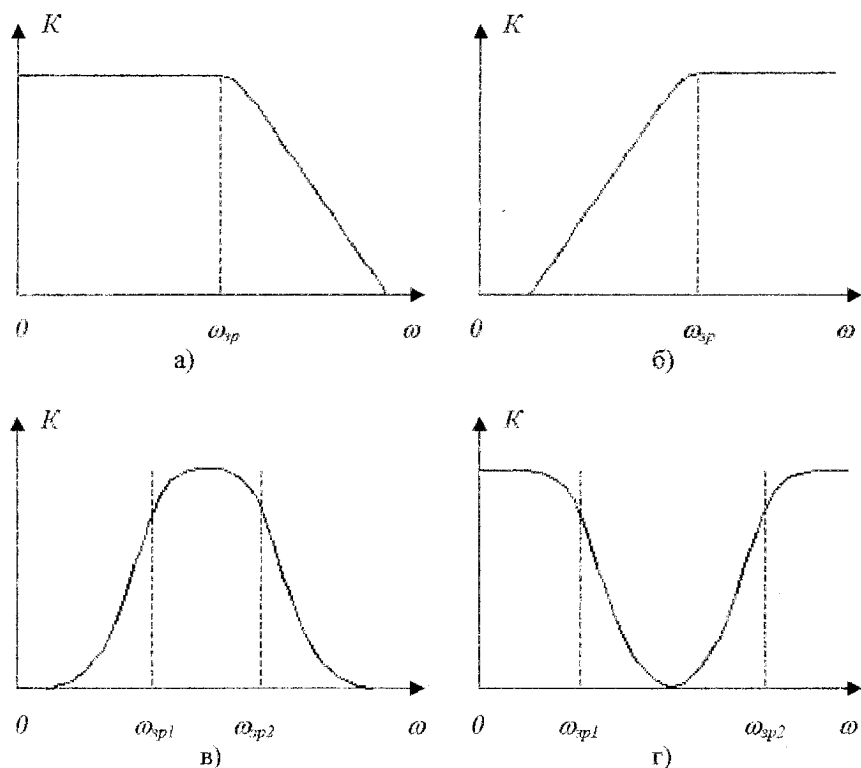


Рисунок 7.1

або п'езокераміку. В таких фільтрах резонатори зв'язані електричним зв'язком через L – або C – елементи; в електромеханічних фільтрах резонатори і зв'язки між ними – електромеханічні.

За схемами ланок фільтрів розрізняють Γ -подібні (рис.7.2, а), T -подібні (рис.7.2, б) та Π -подібні (рис.7.2, в) фільтри.

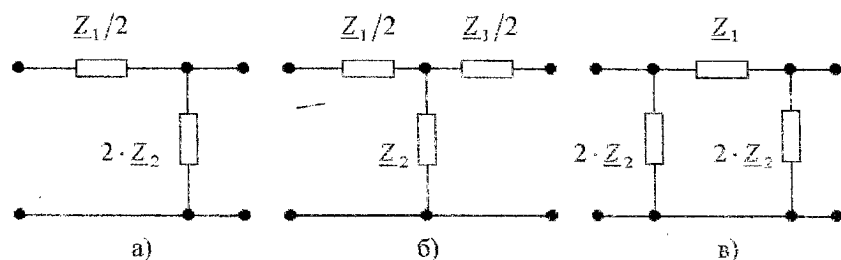


Рисунок 7.2

Можна показати, що Т-подібна і П-подібна ланки складені з Г-подібних ланок (рис.7.3).

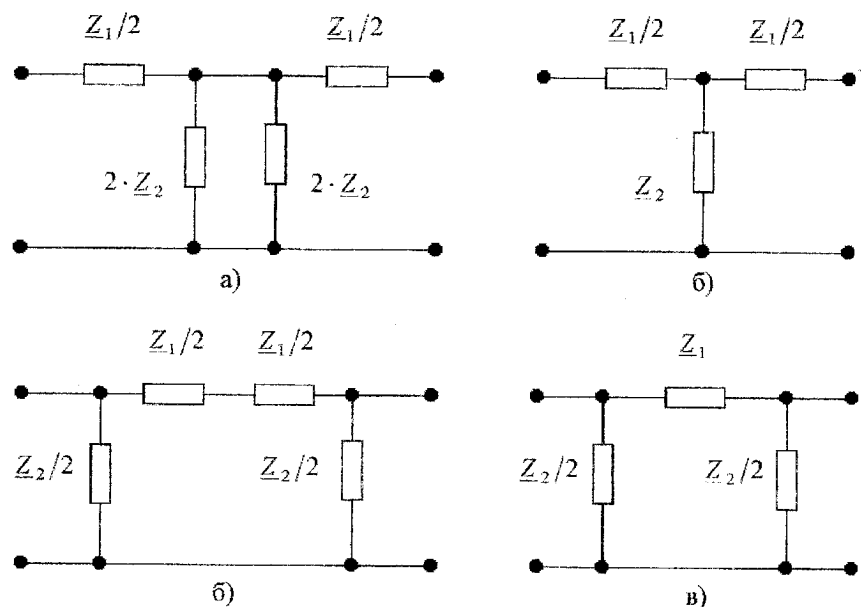


Рисунок 7.3

Характеристичні опори Г-подібної ланки (рис.7.4).

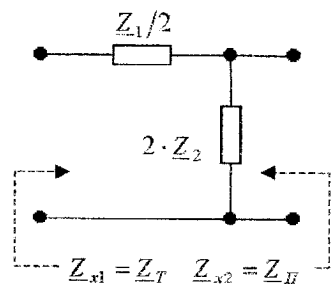


Рисунок 7.4

$$\begin{aligned} Z_T &= \sqrt{Z_{1xx} \cdot Z_{1yx}}; & Z_{1yx} &= \frac{Z_1}{2}; \\ Z_{1xx} &= \frac{Z_1}{2} + 2 \cdot Z_2 = \frac{Z_1 + 4 \cdot Z_2}{2}; \\ Z_{II} &= \sqrt{Z_{2xx} \cdot Z_{2yx}}; & Z_{2xx} &= 2 \cdot Z_2; \end{aligned}$$

$$Z_T = \sqrt{\frac{Z_1 + 4 \cdot Z_2}{2} \cdot \frac{Z_1}{2}} = \sqrt{\frac{Z_1 \cdot (Z_1 + 4 \cdot Z_2)}{4}}$$

$$Z_{2yx} = \frac{\frac{Z_1}{2} \cdot 2 \cdot Z_2}{\frac{Z_1}{2} + 2 \cdot Z_2} = \frac{2 \cdot Z_1 \cdot Z_2}{Z_1 + 4 \cdot Z_2};$$

$$\underline{Z}_H = \sqrt{2 \cdot \underline{Z}_2 \cdot \frac{2 \cdot \underline{Z}_1 \cdot \underline{Z}_2}{4 \cdot \underline{Z}_2 + \underline{Z}_1}} = \sqrt{\frac{4 \cdot \underline{Z}_1 \cdot \underline{Z}_2^2}{4 \cdot \underline{Z}_2 + \underline{Z}_1}}$$

Добуток характеристичних опорів:

$$\underline{Z}_T \cdot \underline{Z}_H = \sqrt{\frac{\underline{Z}_1 \cdot (\underline{Z}_1 + 4 \cdot \underline{Z}_2)}{4} \cdot \frac{4 \cdot \underline{Z}_1 \cdot \underline{Z}_2^2}{\underline{Z}_1 + 4 \cdot \underline{Z}_2}} = \underline{Z}_1 \cdot \underline{Z}_2 \quad (7.2)$$

Знайдемо характеристичні опори Т- і П-подібних ланок, оскільки ці ланки – симетричні кола, в них $\underline{Z}_{1x} = \underline{Z}_{2x}$.

$$\underline{Z}_T = \sqrt{\underline{Z}_{1xx} \cdot \underline{Z}_{1xx}}; \quad \underline{Z}_{1xx} = \frac{\underline{Z}_1}{2} + \underline{Z}_2 = \frac{\underline{Z}_1 + 2 \cdot \underline{Z}_2}{2};$$

$$\underline{Z}_{1xx} = \frac{\underline{Z}_1}{2} + \frac{\underline{Z}_1 \cdot \underline{Z}_2}{\underline{Z}_1 + 2 \cdot \underline{Z}_2} = \frac{\underline{Z}_1^2 + 4 \cdot \underline{Z}_1 \cdot \underline{Z}_2}{2 \cdot (\underline{Z}_1 + 2 \cdot \underline{Z}_2)}; \quad (7.3)$$

$$\underline{Z}_T = \sqrt{\frac{\underline{Z}_1 + 2 \cdot \underline{Z}_2}{2} \cdot \frac{\underline{Z}_1^2 + 4 \cdot \underline{Z}_1 \cdot \underline{Z}_2}{2 \cdot (\underline{Z}_1 + 2 \cdot \underline{Z}_2)}} = \sqrt{\underline{Z}_1 \cdot \underline{Z}_2 \cdot \left(1 + \frac{\underline{Z}_1}{4 \cdot \underline{Z}_2}\right)}$$

$$\underline{Z}_H = \sqrt{\underline{Z}_{1xx} \cdot \underline{Z}_{1xx}}; \quad \underline{Z}_{1xx} = \frac{2 \cdot (\underline{Z}_1 + 2 \cdot \underline{Z}_2) \cdot \underline{Z}_2}{\underline{Z}_1 + 4 \cdot \underline{Z}_2}; \quad \underline{Z}_{1xx} = \frac{2 \cdot \underline{Z}_1 \cdot \underline{Z}_2}{\underline{Z}_1 + 2 \cdot \underline{Z}_2};$$

$$\underline{Z}_H = \sqrt{\frac{(\underline{Z}_1 + 2 \cdot \underline{Z}_2) \cdot 2 \cdot \underline{Z}_2}{\underline{Z}_1 + 4 \cdot \underline{Z}_2} \cdot \frac{2 \cdot \underline{Z}_1 \cdot \underline{Z}_2}{\underline{Z}_1 + 2 \cdot \underline{Z}_2}} = \sqrt{\frac{\underline{Z}_1 \cdot \underline{Z}_2}{1 + \frac{\underline{Z}_1}{4 \cdot \underline{Z}_2}}} \quad (7.4)$$

Добуток характеристичних опорів Т- і П-подібної ланок:

$$\underline{Z}_T \cdot \underline{Z}_H = \sqrt{\underline{Z}_1 \cdot \underline{Z}_2 \cdot \left(1 + \frac{\underline{Z}_1}{4 \cdot \underline{Z}_2}\right) \cdot \frac{\underline{Z}_1 \cdot \underline{Z}_2}{1 + \frac{\underline{Z}_1}{4 \cdot \underline{Z}_2}}} = \underline{Z}_1 \cdot \underline{Z}_2 \quad (7.5)$$

Оскільки \underline{Z}_1 і \underline{Z}_2 – комплексні спряжені величини, їх добуток:

$$\underline{Z}_1 \cdot \underline{Z}_2 = \underline{Z}_1^2 = R_1^2 + X_1^2 = k^2 \quad (7.6)$$

Фільтри, що відповідають виразу (7.6), називають фільтрами типу k .

На рис. 7.4 – 7.7 показані схеми реактивних фільтрів типу k нижніх та верхніх частот, смугових і загороджувальних (для Г-, Т- і П-подібних ланок).

Розрахункові вирази для узгоджених НЧ-фільтрів типу k .

$$R_H = \rho = \sqrt{\frac{L}{C}}; \quad \omega_s = \frac{2}{\sqrt{L \cdot C}}; \quad C = \frac{2}{\omega_s \cdot R_H}; \quad L = \frac{2 \cdot R_H}{\omega_s}$$

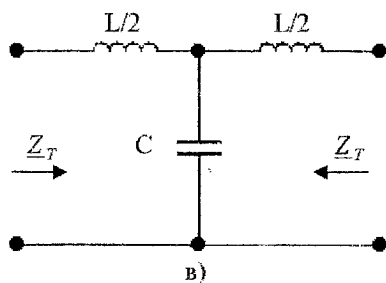
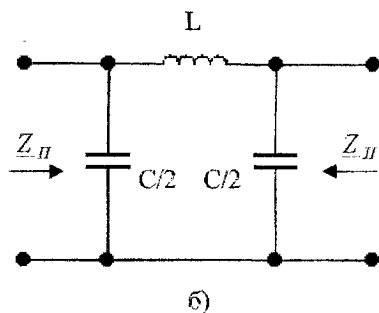
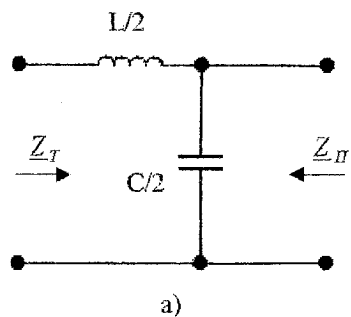


Рисунок 7.4 – Фільтри нижніх частот типу k .

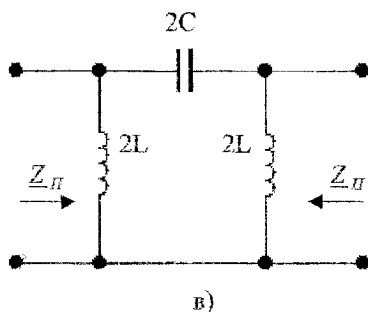
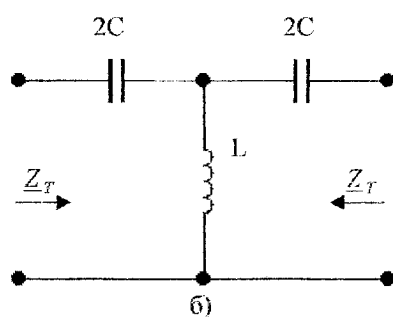
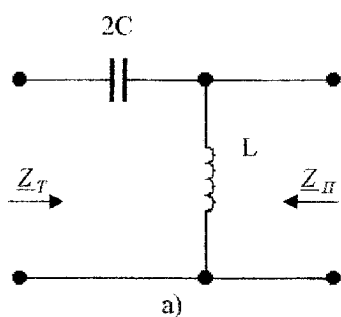


Рисунок 7.5 – Фільтри верхніх частот типу k .

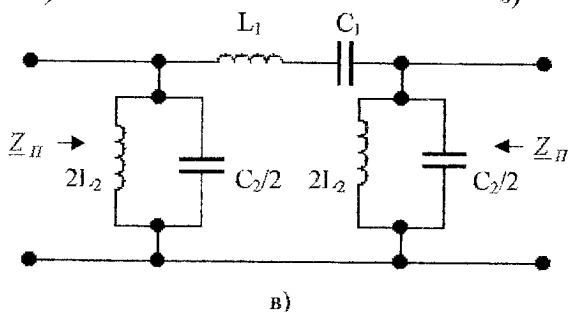
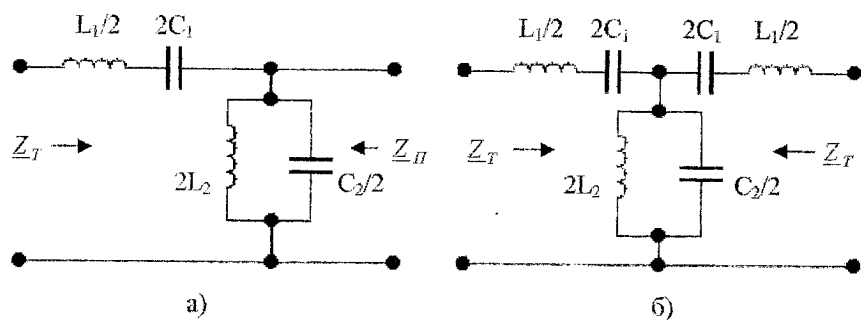


Рисунок 7.6 – Смугові фільтри типу k .

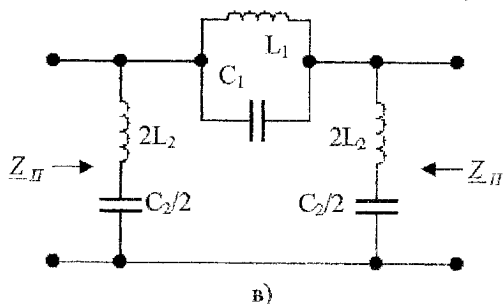
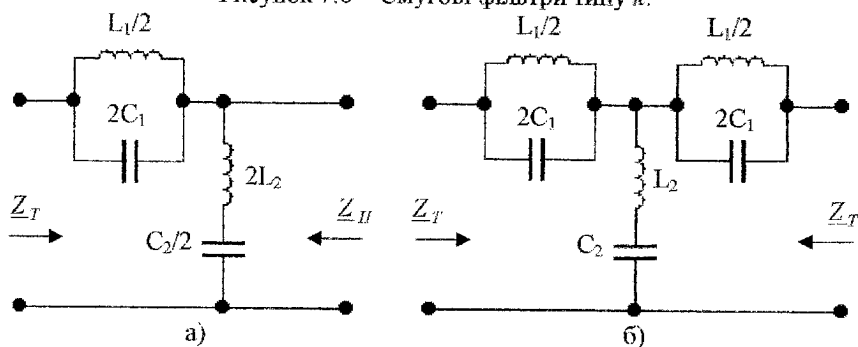


Рисунок 7.7 – Загороджувальні фільтри типу k .

Розрахункові вирази для узгоджених ВЧ-фільтрів типу k .

$$R_H = \rho = \sqrt{\frac{L}{C}}; \quad \omega_s = \frac{1}{2 \cdot \sqrt{L \cdot C}}; \quad C = \frac{1}{2 \cdot \omega_s \cdot R_H}; \quad L = \frac{R_H}{2 \cdot \omega_s}.$$

До недоліків фільтрів типу k можна віднести такі:

- 1) характеристичні опори Z_T і Z_{II} в смузі пропускання фільтрів дуже змінюються в залежності від частоти, тому навантаження з фільтром вдається тільки в дуже вузькій смузі частот;
- 2) амплітудно-частотна характеристика поблизу частоти зрізу має недостатню крутизну, тому не можна забезпечити виділення потрібних частот.

Щоб краще узгодити навантаження з фільтром необхідно, щоб характеристичний опір фільтра був постійним в робочій смузі частот. Для цього потрібно змінити послідовну або паралельну гілки Γ -подібної ланки таким чином, щоб отримати нову Γ -подібну ланку з характеристичним опором, який мало змінюється в смузі пропускання. Інший характеристичний опір цієї ланки повинен дорівнювати характеристичному опорю початкової ланки типу k (яка називається "прототипом"). Такий фільтр називають фільтром типу m .

Та обставина, що характеристичний опір фільтра типу m і прототипу рівні, дозволяє вмикати їх узгоджено і утворювати, таким чином, комбіновані фільтри з покращеними характеристиками.

Оскільки Γ -подібний прототип має два характеристичні опори, можливі два варіанти утворення фільтрів типу m .

1). Рівними залишаються характеристичні опори Z_{II} (рис.7.8). В цьому випадку ланка m -фільтра називається паралельно-похідною.

2). Рівними залишаються характеристичні опори Z_T (рис.7.9). Отримана таким чином ланка m -фільтра називається послідовно-похідною.

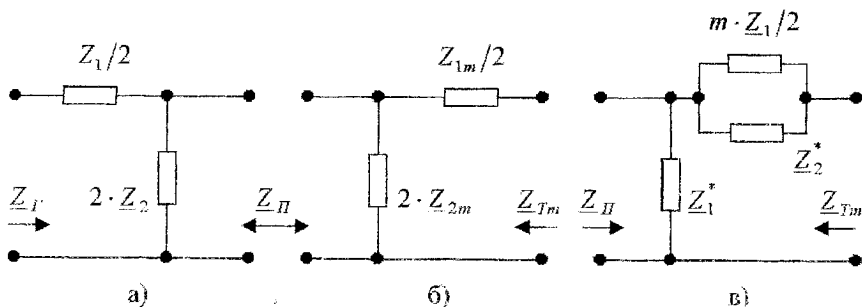


Рисунок 7.8 – Утворення паралельно-похідної ланки типу m .

Комплексні опори \underline{Z}_1^* і \underline{Z}_2^* на рис.7.8 дорівнюють:

$$\underline{Z}_1^* = \frac{2 \cdot \underline{Z}_2}{m}; \quad \underline{Z}_2^* = \frac{2 \cdot m}{1 - m^2} \cdot \underline{Z}_2.$$

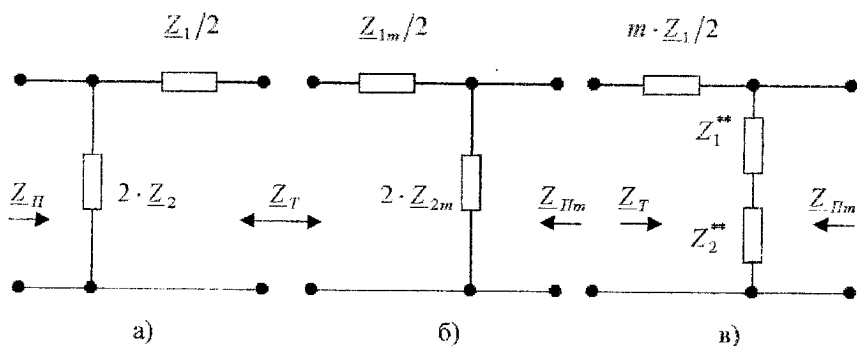


Рисунок 7.9 – Утворення послідовно-похідної ланки типу m .

Комплексні опори \underline{Z}_1^{**} і \underline{Z}_2^{**} на рис.7.9 дорівнюють:

$$\underline{Z}_1^{**} = \frac{2 \cdot \underline{Z}_2}{m}; \quad \underline{Z}_2^{**} = \frac{1 - m^2}{2 \cdot m} \cdot \underline{Z}_1.$$

Розглянемо перший варіант. З умови рівності характеристичних опорів \underline{Z}_{II} (рис.7.8, а і б) маємо:

$$\underline{Z}_{II} = \sqrt{\frac{\underline{Z}_1 \cdot \underline{Z}_2}{1 + \frac{\underline{Z}_1}{4 \cdot \underline{Z}_2}}} = \sqrt{\frac{\underline{Z}_{1m} \cdot \underline{Z}_{2m}}{1 + \frac{\underline{Z}_{1m}}{4 \cdot \underline{Z}_{2m}}}}. \quad (7.7)$$

Нехай

$$\underline{Z}_{2m} = \frac{\underline{Z}_2}{m} \quad (7.8)$$

та виконується умова

$$l \geq m \geq 0. \quad (7.9)$$

Підставивши (7.8) в (7.7) та розв'язуючи рівняння $\frac{2}{\underline{Z}_{1m}}$, отримуємо:

$$\frac{2}{\underline{Z}_{1m}} = \frac{2}{m \cdot \underline{Z}_1} + \frac{1}{\underline{Z}_2} \cdot \frac{1 - m^2}{2 \cdot m}. \quad (7.10)$$

Таким чином, послідовна гілка паралельно-похідної Г-подібної ланки складається з опорів $\frac{m \cdot \underline{Z}_1}{2}$, $\frac{2 \cdot m \cdot \underline{Z}_2}{1 - m^2}$, які в даній ланці зв'язані

паралельно (рис.7.8).

Розглянемо другий варіант. З умови рівності характеристичних опорів Z_T ланок, показаних на рис.7.9, а і б, виходить:

$$Z_T = \sqrt{Z_1 \cdot Z_2 \cdot \left(1 + \frac{Z_1}{4 \cdot Z_2}\right)} = \sqrt{Z_{1m} \cdot Z_{2m} \cdot \left(1 + \frac{Z_{1m}}{4 \cdot Z_{2m}}\right)}. \quad (7.11)$$

Нехай

$$Z_{1m} = m \cdot Z_1 \quad (7.12)$$

та зберігається умова (7.9).

Підставляючи (7.12) в (7.11) та розв'язуючи рівняння відносно $2 \cdot Z_{2m}$, отримаємо:

$$2 \cdot Z_{2m} = \frac{2 \cdot Z_2}{m} + \frac{Z_1}{2} \cdot \frac{1 - m^2}{m}. \quad (7.13)$$

З виразу (7.13) видно, що паралельна гілка послідовно-похідної ланки Г-подібного фільтра типу m складається з двох послідовно увімкнених опорів $\frac{2 \cdot Z_2}{m}$ і $\frac{(1 - m) \cdot Z_1}{2 \cdot m^2}$ (рис.7.9, в).

Щоб зменшити габарити фільтрів, застосовують безіндукційні фільтри (RC-фільтри), які складаються з активних опорів і ємностей. На рис.7.10 – 7.12 показані схеми RC-фільтрів.

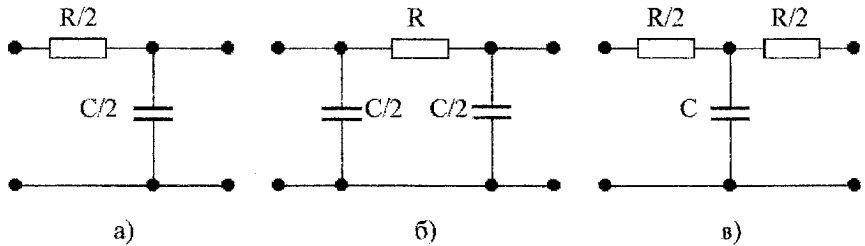


Рисунок 7.10 – RC-фільтри нижніх частот.

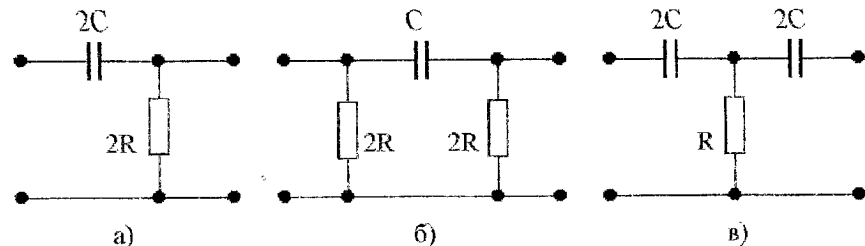


Рисунок 7.11 – RC-фільтри верхніх частот.

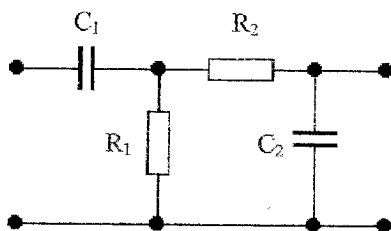


Рисунок 7.12 -- Смуговий RC-фільтр.

Розрахункові вирази для RC-фільтрів нижніх частот:

$$\omega_s = \frac{4}{R \cdot C}; \quad R = \frac{4}{\omega_s \cdot C}; \quad C = \frac{4}{\omega_s \cdot R}$$

Розрахункові вирази для RC-фільтрів верхніх частот:

$$\omega_s = \frac{1}{4 \cdot R \cdot C}; \quad R = \frac{1}{4 \cdot \omega_s \cdot C}; \quad C = \frac{1}{4 \cdot \omega_s \cdot R}$$

Розрахункові вирази для RC-фільтра (рис.7.13):

$$\omega_p = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}}; \quad \omega_{1,2} = \frac{R}{2 \cdot L} \pm \sqrt{\left(\frac{R}{2 \cdot L}\right)^2 + \frac{1}{L \cdot C}}$$

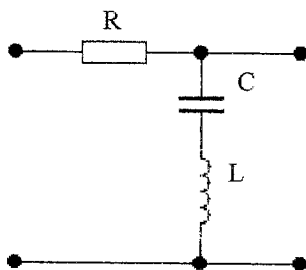


Рисунок 7.13

7.2 Домашнє завдання.

7.2.1 За допомогою моделювальної програми Electronics Workbench змоделювати АЧХ ФНЧ, ФВЧ, смугового та загороджувального фільтрів для заданих параметрів досліджуваних схем.

7.2.2 Визначити смуги пропускання досліджуваних фільтрів.

7.2.3 Результати моделювання подати у вигляді графіків.

7.3 Порядок виконання роботи.

7.3.1 Ознайомитись зі схемами лабораторного макета (рис.7.14 і рис.7.15).

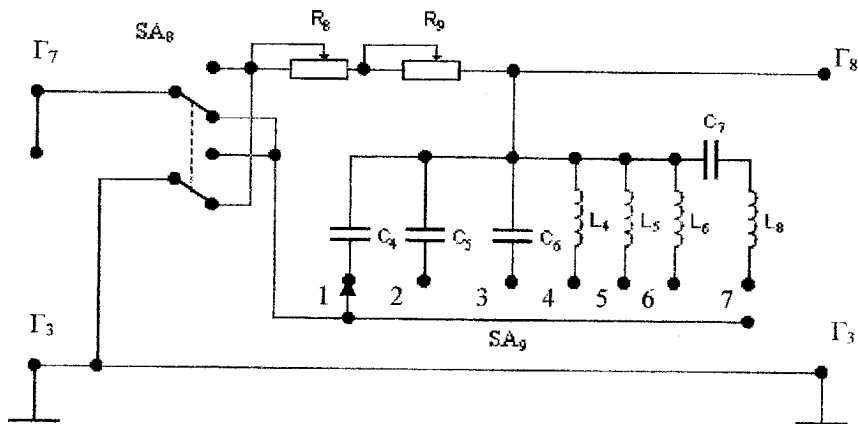


Рисунок 7.14

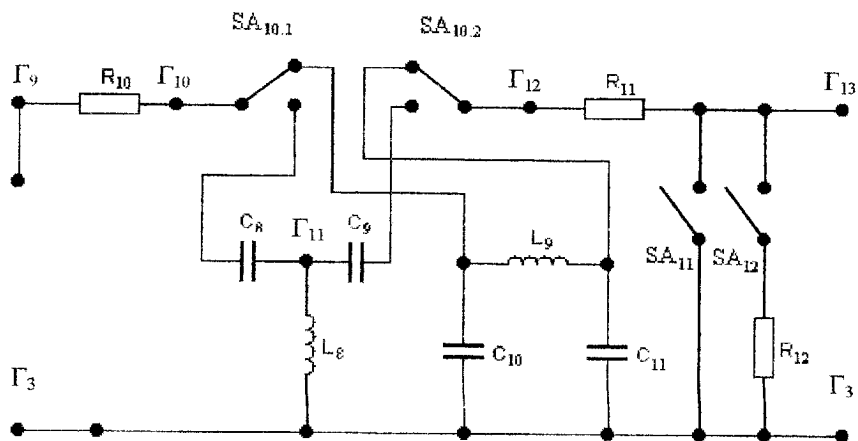


Рисунок 7.15

7.3.2 Дослідити Г-подібний RC-фільтр нижніх частот (рис.7.14).

7.3.2.1 За заданими трьома частотами зрізу та відомими C_4 , C_5 , C_6 визначити потрібні значення опорів R (сума R_8 і R_9).

7.3.2.2 Виставити потрібні значення опорів R і зняти АЧХ фільтрів нижніх частот. Результати вимірів занести до табл.7.1.

7.3.2.3 За отриманими амплітудно-частотними характеристиками визначити смуги пропускання досліджуваних фільтрів.

Таблиця 7.1

$f, \text{кГц}$																				
U_c																				C_4
U_c																				C_5
U_c																				C_6

7.3.3 Дослідити Г-подібний RC-фільтр верхніх частот (рис.7.14), для чого виконати завдання за п.п.7.2.2.1 – 7.2.2.3, а результати занести до табл.7.2.

Таблиця 7.2

$f, \text{кГц}$																				
U_R																				C_4
U_R																				C_5
U_R																				C_6

7.3.4 Дослідити Г-подібний ВЧ RL-фільтр (рис.7.14).

7.3.4.1 За заданими трьома частотами зрізу та відомими L_4, L_5, L_6 визначити потрібні значення опорів R (сума R_8 і R_9).

7.3.4.2 Виставити потрібні значення опорів R і зняти АЧХ фільтрів ВЧ. Результати вимірів занести до табл.7.3.

Таблиця 7.3

$f, \text{кГц}$																				
U_L																				L_4
U_L																				L_5
U_L																				L_6

7.3.4.3 За отриманими амплітудно-частотними характеристиками визначити смуги пропускання досліджуваних фільтрів.

7.3.4.5 Дослідити Г-подібний RL-фільтр нижніх частот (рис.7.14), для чого виконати завдання за п.п.7.2.4.1 – 7.2.4.3, а результати занести до табл.7.4.

Таблиця 7.4

$f, \text{кГц}$																				
U_R																				L_4
U_R																				L_5
U_R																				L_6

7.3.6 Дослідити Г-подібний смуговий фільтр (рис.7.14).

7.3.6.1 За заданими двома значеннями R зняти АЧХ смугового фільтра. Результати вимірів занести до табл.7.5.

Таблиця 7.5

$f, \text{кГц}$																				
U_R																				$R=$
U_R																				$R=$

7.3.6.2 Використавши отримані графіки АЧХ, знайдемо смуги пропускання досліджуваних смугових фільтрів.

7.3.7 Дослідити Г-подібний загороджувальний фільтр, виконавши завдання п.п.7.2.6.1 та 7.2.6.2 стосовно загороджувального фільтра. Результати вимірів занести до табл.7.6.

Таблиця 7.6

$f, \text{кГц}$																				
U_{LC}																				$R=$
U_{LC}																				$R=$

7.3.8 Дослідити П-подібний LC-фільтр нижніх частот (рис.7.15), для чого, змінюючи частоту сигналу на вході, зняти АЧХ. Результати занести до табл.7.7.

Таблиця 7.7

$f, \text{кГц}$																				
$U_{вих}$																				

7.3.9 Дослідити Т-подібний LC-фільтр верхніх частот (рис.7.15), виконавши завдання п.7.2.8. Результати занести до табл.7.8.

Таблиця 7.8

$f, \text{кГц}$																				
$U_{вих}$																				

7.4 Склад звіту:

- короткі теоретичні відомості;
- розрахунки та графіки, отримані при підготовці до заняття;
- схеми досліджуваних кіл;

- результати експериментальних досліджень. Графіки АЧХ, необхідні розрахунки.

- висновки за результатами досліджень.

7.5 Контрольні запитання.

1. Які кола називають електричними фільтрами?
2. Класифікація фільтрів за частотною ознакою.
3. Класифікація фільтрів за схемами їх ланок.
4. Характеристичні опори Г-подібної ланки фільтра типу k .
5. Характеристичні опори Т- і П-подібної ланки фільтра типу k .
6. Схеми реактивних фільтрів типу типу k .
7. Паралельно-похідний фільтр типу m .
8. Послідовно-похідний фільтр типу m .
9. Характеристичні опори Т- і П-подібних фільтр типу m .
10. Схеми безіндукційних фільтрів.

8 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №10. ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ В ЛІНІЙНИХ КОЛАХ

Мета роботи – дослідження перехідних процесів в лінійних колах першого та другого порядків.

8.1 Короткі теоретичні відомості.

Перехідним називають електромагнітний процес, що виникає в електричному колі при переході його від одного стаціонарного стану до іншого внаслідок зміни параметрів чи схеми кола. Будь-які зміни в колі можна подати у вигляді тих чи інших перемикань, які в електротехніці називають комутаціями.

Закони комутації:

а) перший – в будь-якій гілці з індуктивністю струм і магнітний потік в момент комутації зберігають ті значення, які вони мали безпосередньо перед комутацією, і надалі змінюються, починаючи з цих значень;

б) другий – в будь-якій гілці з ємністю напруга і заряд на ємності зберігають в момент комутації ті значення, які вони мали безпосередньо перед комутацією, і надалі змінюються, починаючи з цих значень.

Значення струму в індуктивності і напруги на ємності в момент комутації називають незалежними початковими умовами. Значення напруги на індуктивності і струму в ємності, а також струму в опорі і напруги на ньому в момент комутації називають залежними початковими умовами.

Перехідні процеси можуть бути описані неоднорідними диференціальними рівняннями, порядок яких залежить від кількості реактивних елементів, що входять в електричне коло. Стандартний розв'язок такого рівняння зводиться до знаходження “примусової” складової, яка визначається зовнішнім впливом на коло, та “вільної” складової, що обумовлена внутрішніми джерелами енергії (зосередженими в реактивних елементах). Математична модель перехідного процесу є сумою цих складових.

Перехідний процес в колі RL. Нехай в момент часу $t = 0$ до кола (рис.8.1) під'єднується джерело е.р.с. $e(t)$.

Диференціальне рівняння такого кола:

$$L \cdot \frac{di(t)}{dt} + R_i(t) = e(t).$$

Його характеристичне рівняння:

$$p \cdot L + R = 0.$$

Корінь цього виразу:

$$p = -\frac{R}{L}$$

Вираз для вільної складової струму в індуктивності:

$$i_{\text{вн}}(t) = A \cdot e^{pt} = A \cdot e^{-\frac{R}{L}t} = A \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (8.1)$$

де A – постійна інтегрування, яка є початковим значенням вільної складової струму (при $t = 0$);

$\tau = \frac{L}{R}$ – постійна часу кола.

Перехідний струм визначається для стаціонарного режиму після комутації:

$$i_{\text{нр}}(t) = \frac{e(t)}{Z}, \quad (8.2)$$

де Z – повний опір кола.

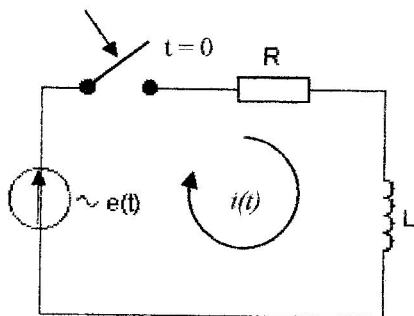


Рисунок 8.1

З врахуванням (8.1) та (8.2) перехідний струм в колі RL буде таким:

$$i(t) = \frac{e(t)}{Z} + A \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (8.3)$$

Постійна інтегрування A знаходиться з (8.3) при $t = 0$ за першим законом комутації:

$$\begin{aligned} i(0) &= \left. \frac{e(t)}{Z} \right|_{t=0} + A, \\ A &= i(0) - \left. \frac{e(t)}{Z} \right|_{t=0}. \end{aligned} \quad (8.4)$$

Перехідний процес в колі RC . Нехай в момент $t = 0$ до кола (рис.8.2) під'єднується джерело е.р.с. $e(t)$.

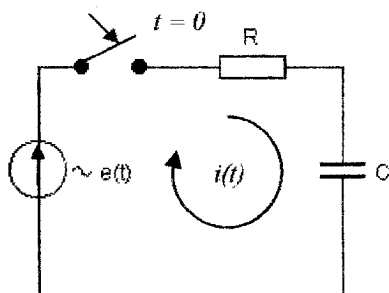


Рисунок 8.2

На підставі другого закону Кірхгофа рівняння для післякомутаційного стану має вигляд

$$R \cdot i(t) + u_c(t) = e(t).$$

З врахуванням того, що

$$i(t) = C \cdot \frac{du_c(t)}{dt},$$

отримаємо

$$R \cdot C \cdot \frac{du_c(t)}{dt} + u_c(t) = e(t).$$

Характеричне рівняння для даного випадку має вигляд

$$R \cdot C \cdot p + 1 = 0,$$

а його корінь

$$p = -\frac{1}{R \cdot C} = -\frac{1}{\tau},$$

де $\tau = R \cdot C$ — постійна часу кола.

Таким чином, вільна складова напруги на ємності:

$$u_{C_{\text{в}}}(t) = A \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

за формою повторює вільну складову струму в індуктивності.

Примусова складова напруги на ємності:

$$u_{C_{пр}}(t) = \frac{e(t)}{Z} \cdot X_C,$$

де X_C – реактивний опір ємності.

Перехідна напруга на ємності

$$u_C(t) = \frac{e(t)}{Z} \cdot X_C + A \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (8.5)$$

Постійна інтегрування визначається з виразу (8.5) з урахуванням другого закону комутації при $t = 0$.

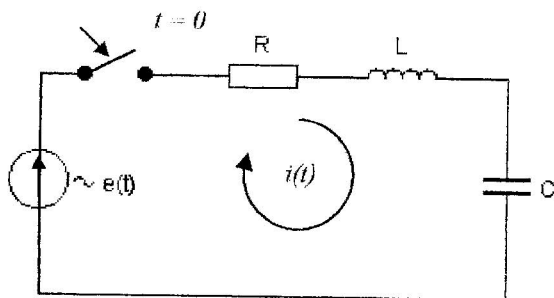


Рисунок 8.3

Перехідний процес в колі RLC. При ввімкненні в коло RLC е.р.с. $e(t)$ (рис.8.3) перехідний процес досліджується за допомогою диференціального рівняння

$$L \cdot \frac{di^2(t)}{dt^2} + R \cdot \frac{di(t)}{dt} + \frac{i(t)}{C} = \frac{de(t)}{dt}. \quad (8.6)$$

Відповідне йому характеристичне рівняння:

$$L \cdot p^2 + R \cdot p + \frac{1}{C} = 0 \quad (8.7)$$

має корені:

$$p_{1,2} = -\frac{R}{2 \cdot L} \pm \sqrt{\left(\frac{R}{2 \cdot L}\right)^2 - \frac{1}{L \cdot C}} = -\delta \pm \sqrt{\delta^2 - \omega_p^2}, \quad (8.8)$$

$$\text{де } \delta = \frac{R}{2 \cdot L}; \quad \omega_p = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}}.$$

З виразу (8.8) знаходимо постійну часу кола

$$\tau = \frac{1}{\delta} = \frac{2 \cdot R}{L}. \quad (8.9)$$

Вираз для вільної складової перехідного струму залежить від коренів характеристичного рівняння:

а) корені характеристичного рівняння p_1 і p_2 – дійсні, від'ємні, різні (аперіодичний процес)

$$i_{вт}(t) = A_1 \cdot e^{p_1 t} + A_2 \cdot e^{p_2 t}; \quad (8.10)$$

б) корені характеристичного рівняння комплексні, спряжені (коливальний процес)

$$i_{вт}(t) = A \cdot e^{-\delta t} \cdot \sin(\omega_{вт} \cdot t + \psi), \quad (8.11)$$

$$\text{де } \omega_{вт} = \sqrt{\omega_p^2 - \delta^2};$$

в) корені характеристичного рівняння дійсні, від'ємні, рівні (критичний процес)

$$i_{вт}(t) = A_1 \cdot e^{-\delta t} + A_2 \cdot e^{-\delta t}. \quad (8.12)$$

Нехай p_1 і p_2 – від'ємні, дійсні, різні, тоді перехідний струм матиме вигляд

$$i(t) = i_{вт}(t) + A_1 \cdot e^{p_1 t} + A_2 \cdot e^{p_2 t}. \quad (8.13)$$

У відповідності з першим законом Кірхгофа для кола (рис.8.3) можемо записати

$$i(t) \cdot R + L \cdot \frac{di(t)}{dt} + u_C(t) = e(t). \quad (8.14)$$

З виразу (8.14) знаходимо

$$\frac{di(t)}{dt} = \frac{e(t) - i(t) \cdot R - u_C(t)}{L}. \quad (8.15)$$

Для знаходження постійної інтегрування використовуються вирази (8.13) і (8.15). Так, з врахуванням початкових умов, можемо записати

$$i(0) = i_{np}(0) + A_1 + A_2, \quad (8.16)$$

$$\frac{di(t)}{dt} = e(0) - i(0) \cdot R - u_C(0). \quad (8.17)$$

Виконуємо диференціювання лівої і правої частини рівняння (8.13)

$$\frac{di(t)}{dt} = \frac{di_{np}(t)}{dt} + p_1 \cdot A_1 \cdot e^{p_1 t} + p_2 \cdot A_2 \cdot e^{p_2 t}, \quad (8.18)$$

при $t = 0$ маємо:

$$\frac{di(0)}{dt} = \frac{di_{np}(0)}{dt} + p_1 \cdot A_1 + p_2 \cdot A_2, \quad (8.19)$$

і з урахуванням (8.17) остаточно можемо записати:

$$e(0) - i(0) \cdot R - u_C(0) = \frac{di_{np}(0)}{dt} + p_1 \cdot A_1 + p_2 \cdot A_2. \quad (8.20)$$

З виразів (8.16) і (8.20) знаходимо постійні інтегрування A_1 і A_2 .

Для інших випадків значень коренів постійні інтегрування визначаються аналогічно.

8.2 Порядок виконання роботи.

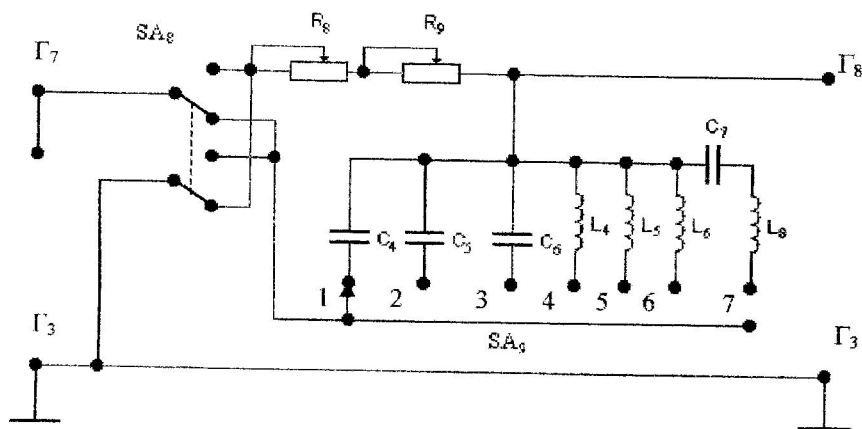


Рисунок 8.4 – Схема електрична лабораторного макета.

8.2.1 Дослідження перехідного процесу в колі RL.

8.2.1.1 Перемикач SA_8 поставити у верхнє положення (рис.8.4).

8.2.1.2. На вхід кола (рис.8.4) подати сигнал від генератора (контакти Г₇, Г₃) прямокутних імпульсів Г5-54. Вихідний сигнал з контактів (Г₈, Г₃) подати на вхід “У” осцилографа С1-76.

8.2.1.3 За допомогою перемикача SA₉ і змінних опорів R₈ і R₉ дослідити перехідний процес в колі для різних значень τ (не менше трьох). Замалювати осцилограми.

8.2.2 Дослідження перехідних процесів в колі RC.

8.2.2.1 Перемикач SA₈ поставити в нижнє положення (рис.8.4).

8.2.2.2 Дослідити перехідний процес згідно п.п.8.2.1.2 – 8.2.1.3.

8.2.3 Дослідження перехідного процесу в колі RLC.

8.2.3.1 Перемикач SA₈ поставити в нижнє положення (рис.8.4).

Перемикач SA₈ поставити в положення 7.

8.2.3.2 Змінюючи постійну часу кола τ за допомогою R₈ і R₉ дослідити в колі аперіодичний, критичний та коливальний процеси. Зарисувати в масштабі осцилограми для всіх випадків перехідного процесу.

8.2.4 Провести моделювання перехідних процесів в колах RL, RC і RLC за програмою п.п.8.2.1 – 8.2.3.

8.2.5 Опрацювання результатів досліджень.

8.2.5.1 Визначити експериментальні значення постійних часу τ_e кола з графіків $u_R(t)$ (коло RL) та $u_C(t)$ (коло RC) на рівні 0,632 стаціонарного значення (рис.8.5).

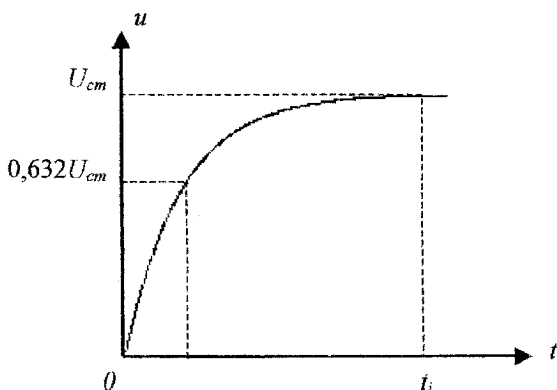


Рисунок 8.5

З виразів

$$\tau = \frac{L}{R}, \quad \tau = C \cdot R$$

за відомими R , L , C розрахувати теоретичні значення постійних часу досліджуваних кіл (RL і RC) та порівняти зі значеннями, отриманими експериментальним шляхом.

Визначити експериментально період вільних коливань $T_{вл.е}$ з графіка $u_R(t)$ (рис.8.6) в режимі коливального процесу (коло RLC). За визначенням $T_{вл.е}$ знайти $\omega_{вл.е}$

$$\omega_{вл.е} = \frac{2 \cdot \pi}{T_{вл.е}}$$

та порівняти з теоретичним значенням

$$\omega_{вл.т} = \sqrt{\frac{1}{L \cdot C} - \left(\frac{R}{2 \cdot L}\right)^2}$$

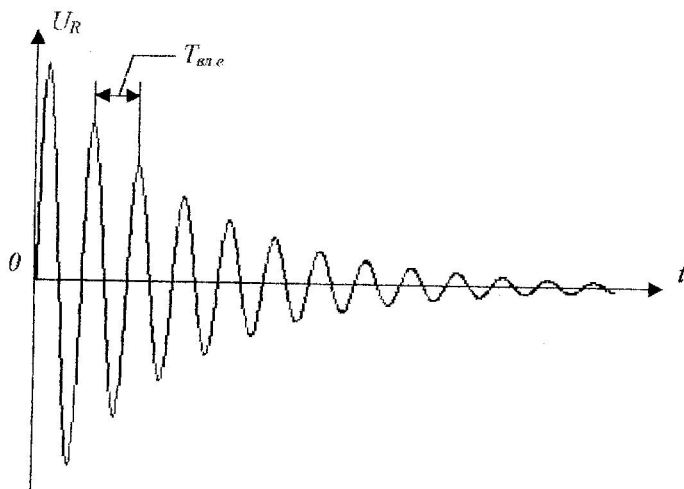


Рисунок 8.6

8.3 Склад звіту:

- короткі теоретичні відомості;
- графіки перехідних напруг;
- розрахунки;
- зображення досліджуваних схем;
- результати моделювання;
- висновки з аналізом отриманих результатів.

8.4 Контрольні запитання.

1. Перехідний процес в колі RC, $e(t) = E$.
2. Перехідний процес в колі RC, $e(t) = E_m \cdot \cos(\omega t)$.
3. Перехідний процес в колі RL, $e(t) = E$.
4. Перехідний процес в колі RL, $e(t) = E_m \cdot \cos(\omega t)$.
5. Перехідний процес в колі RLC, $e(t) = E$, $\delta > \omega_0$.
6. Перехідний процес в колі RLC, $e(t) = E$, $\delta = \omega_0$.
7. Перехідний процес в колі RLC, $e(t) = E$, $\delta < \omega_0$.
8. Закони комутації.
9. Початкові умови перехідного процесу.
10. “Примусова” і “вільна” складові перехідного процесу.

ЛІТЕРАТУРА

1. Атабеков Г. И. Основы теории цепей. Учеб. для вузов. – М.: Энергия, 1969.
2. Зевеке Г. В., Ионкин П. А., Нетушил А. В. и др. Основы теории цепей. – М.: Высшая школа, 1975.
3. Зериов П. В., Карпов В. Г. Теория радиотехнических цепей. – Л.: Энергия, 1972.
4. Баскаков С. И. Радиотехнические цепи и сигналы: Учеб. для вузов по спец. “Радиотехника”. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1988.
5. Гоноровский И. С. Радиотехнические цепи и сигналы. – М.: Энергия, 1986.
6. Теорія кіл і сигналів. Лабораторний практикум: Навчальний посібник / М. О. Куцевол – В.: ВДТУ, 1998.

Додаток А Моделювання характеристик кола

Моделювання рекомендується виконувати за допомогою моделювальної програми Electronics Workbench (v. 5.12).

В цій програмі, на відміну від інших, на екрані зображаються вимірювальні прилади з органами керування, максимально наближеними до реальних. Користувач звільняється від досить абстрактних (хоча і не дуже складних) правил складання завдань на моделювання. Достатньо на схему помістити двоканальний осцилограф і генератор сигналів – і програма сама “здогадається”, що потрібно аналізувати перехідні процеси. Якщо на схемі розмістити аналізатор частотних характеристик, то буде розраховано режим за постійним струмом, виконано лінеаризування нелінійних компонентів і потім проведено розрахунок характеристик схеми в частотній області. Діапазон аналізованих частот, коефіцієнт підсилення і характер оцифровування даних (в лінійному або логарифмічному масштабах) встановлюється на передній панелі маніпулятором “миша”. Щоб розпочати моделювання достатньо ввімкнути вимикач. Після цього на пристроях індикації цифрових вольтметрів і амперметрів буде зафіксовано режим за постійним струмом, на екрані вимірювача частотних характеристик зображено частотні характеристики

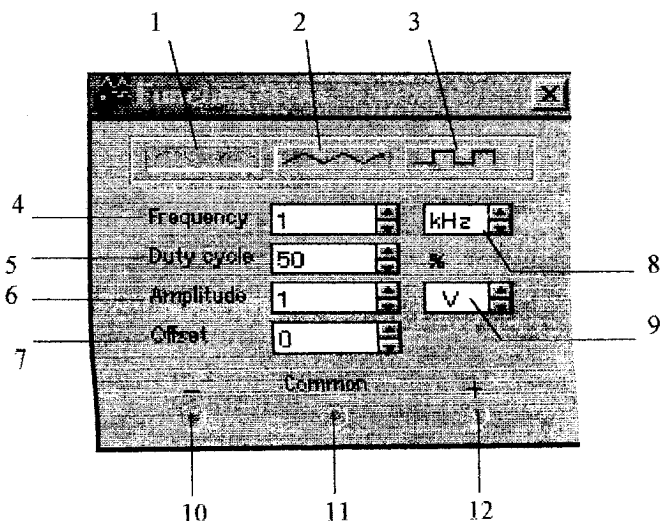


Рисунок 1 - Передня панель функціонального генератора

- 1 – режим генерування синусоїдного сигналу;
- 2 – режим генерування трикутного сигналу;
- 3 – режим генерування прямокутного сигналу;
- 4 – вікно встановлення частоти вихідного сигналу;
- 5 – вікно встановлення коефіцієнта заповнення, в %;
- 6 – вікно встановлення амплітуди вихідного сигналу;
- 7 – вікно встановлення зсуву постійної складової вихідного сигналу;
- 8, 9 – множники частоти і амплітуди, відповідно;
- 10, 11, 12 – вихідні клеми (на клеммах "+" "-" прилад генерує парафазний сигнал).

(АЧХ і ФЧХ), а на екрані осцилографа будуть безперервно зображуватись графіки напруг до тих пір, поки не заповниться буферна пам'ять, а потім можна зупинити моделювання або обнулити пам'ять і продовжити спостереження.

Розглянемо детальніше особливості програми.

На панелі керування розміщені основні робочі вікна, за допомогою яких утворюється потрібна схема, під'єднуються генератор вхідного сигналу, вимірювач частотних характеристик і осцилограф.

З вікна Instruments вибираємо функціональний генератор (Function Generator) (рис.1).

Цей прилад дозволяє формувати гармонічний, трикутний і прямокутний сигнали. Для його роботи потрібно задати умовну робочу частоту (Frequency), необхідні амплітуду (Amplitude), робочий цикл (Duty cycle) і початкову фазу (Offset). Щоб отримати гармонічний сигнал та прямокутний імпульсний зі шпаруватістю 2 робочий цикл має дорівнювати 50%.

З вікна Basic вибираємо необхідні електричні елементи кола, з яких формуємо електричну схему:

- а) опір (Resistor);
- б) ємність (Capacitor);
- в) індуктивність (Inductor).

Для цього за допомогою маніпулятора "Миша" наводимо курсор на потрібний елемент, натискаємо ліву клавішу маніпулятора і, не відпускаючи її, переносимо потрібний елемент на набірне поле (основне робоче вікно). Аналогічним чином вибираємо всі потрібні елементи. Для задання необхідних параметрів вибраному елементу потрібно навести на нього курсор і подвійно натиснути на ліву клавішу маніпулятора. Відкриється вікно властивостей елемента, в якому робимо відповідні зміни параметрів.

Щоб з'єднати між собою елементи в схему, необхідно маніпулятором підвести курсор до виводу елемента. При цьому на виводі утворюється

чорна точка. Натиснувши і не відпускаючи ліву клавішу маніпулятора (курсор при цьому зникає), ведемо лінію до виводу потрібного елемента (при з'єднанні на виводі другого елемента знову утворюється чорна точка) і відпускаємо ліву клавішу.

Примітка. Утворена схема має бути обов'язково заземлена (вибрати вікно Sources з панелі інструментів, а потім взяти елемент "земля" (Ground)).

З вікна Instruments вибираємо вимірювач частотних характеристик (ВЧХ) (Bode Plotter), переносимо його в основне робоче вікно і під'єднуємо до досліджуваної схеми (рис.2.16). Для того, щоб задати необхідні параметри ВЧХ, наводимо курсор в робочому вікні на нього і подвійно натискаємо на ліву клавішу. На екрані з'являється передня панель приладу, на якій, натиснувши клавішу Magnitude, одержимо вимірювач АЧХ (рис.2.17), натиснувши клавішу Phase, - вимірювач ФЧХ (рис.2.18)

Вертикальна (Vertical) і горизонтальна (Horizontal) осі вимірювача можуть бути задані в логарифмічному Log і лінійному Lin масштабах, який визначається початковим (I) та кінцевим (F) значеннями. Початкові і кінцеві значення вертикальних і горизонтальних масштабів попередньо необхідно встановити в максимальне значення і поступово зменшувати, щоб отримати оптимальне зображення графіка.

Запуск схеми здійснюється одночасним натисканням клавіш Ctrl+G на клавіатурі.

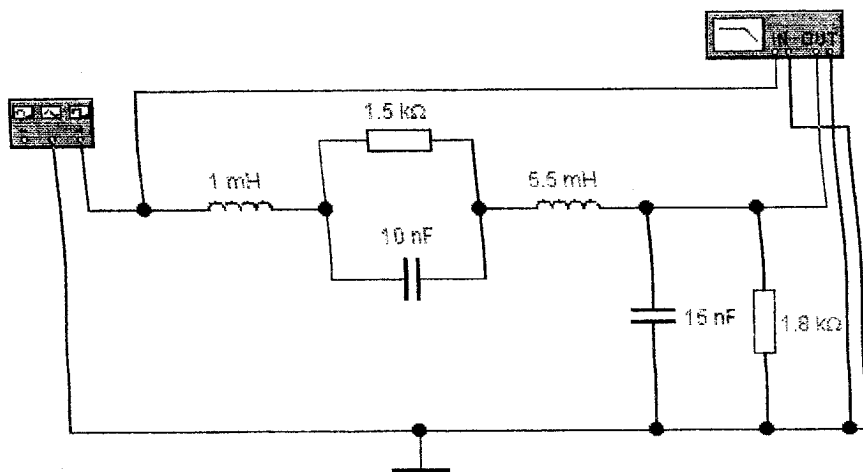


Рисунок 2 - Досліджувана схема з генератором на вході і вимірювачем частотних характеристик (ВЧХ) на виході

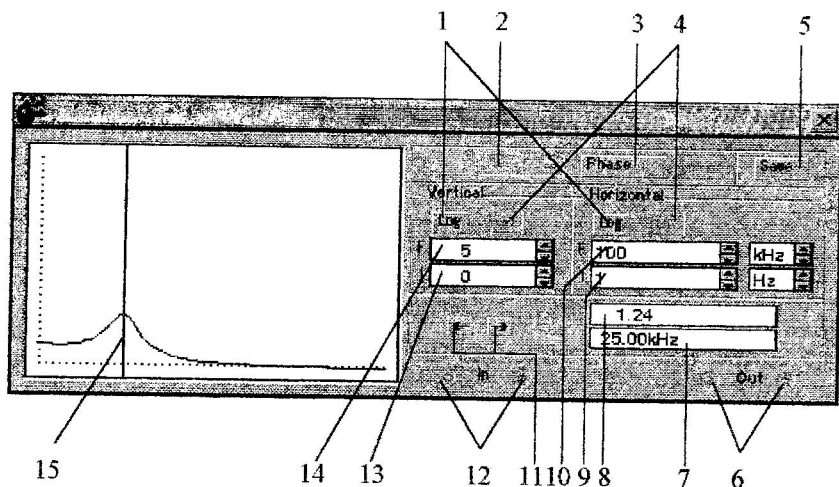


Рисунок 3 - Передня панель вимірювача АЧХ

- 1 – клавіша встановлення логарифмічного масштабу;
- 2 – клавіша вмикання режиму вимірювання АЧХ;
- 3 – клавіша вмикання режиму вимірювання ФЧХ;
- 4 – клавіша встановлення лінійного масштабу;
- 5 – клавіша для запису результатів роботи ВЧХ на жорсткій або
звучкій носій;
- 6 – клеми для під'єднання вихідного сигналу;
- 7 – вікно визначення положення візирної лінії по осі абсцис (Horizontal);
- 8 – вікно визначення положення візирної лінії по осі ординат (Vertical);
- 9, 10 – мінімальна і максимальна межа осі абсцис (Horizontal),
відповідно.
- 11 – клавіші зсуву візирної лінії ліворуч і праворуч;
- 12 – клеми для під'єднання вхідного сигналу;
- 13, 14 – мінімальна і максимальна межа осі ординат (Vertical),
відповідно
- 15 – візирна лінія.

3 вікна Instruments вибираємо осцилограф (рис.2.19) (Oscilloscope) і під'єднуємо його канал А (Channel A) до виходу схеми, попередньо встановивши потрібний масштаб по осі Y і по осі X.

На панелі осцилографа вибираємо клавішу параметрів Y/Г, оскільки нам необхідно на осі X мати час.

Часова розгортка може змінюватись в межах 0,1нс/Под.(0,1нс/Div)-1с/Под.(1с/Div). Щоб отримати оптимальне зображення одного періоду

вихідного сигналу, частоту розгортки потрібно узгодити з частотою функціонального генератора.

Наприклад, якщо досліджується сигнал частотою 1 кГц, часова розгортка повинна бути близькою до 0,1 мс. При цьому можна спостерігати один період сигналу. Один період сигналу частотою 10 кГц потребує часової розгортки 0,01 мс.

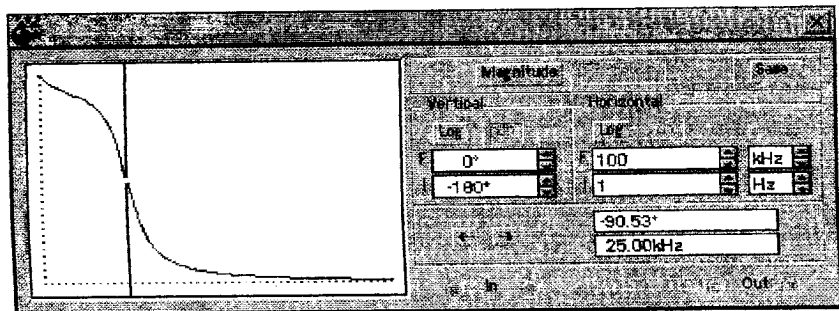


Рис.2.18 - Передня панель вимірювача ФЧХ

Канал вертикального підсилення осцилографа дозволяє змінювати масштаб в межах 0,01 мВ/Под. (0,01 mv/Div) - 5 кВ/Под.(5 kv/Div).

Щоб отримати оптимальне зображення по вертикалі, необхідно установку масштабу узгодити з амплітудою сигналу. Наприклад, вхідний сигнал змінного струму амплітудою 3 В заповнює екран осцилографа повністю, якщо встановити масштаб 1 В/Под. (1 V/Div).

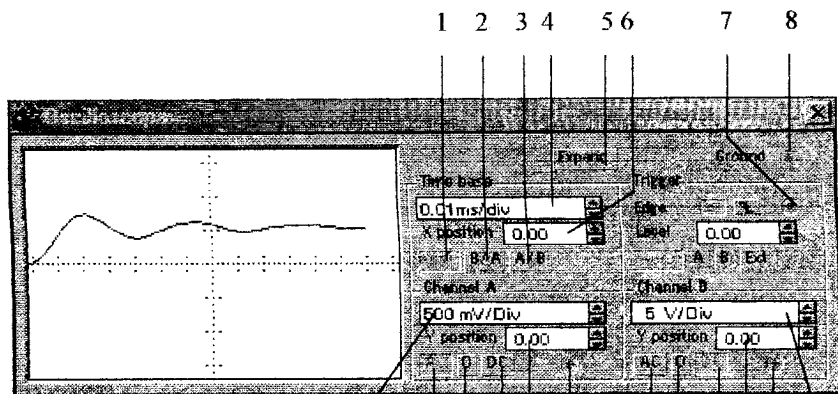


Рисунок 5 - Передня панель осцилографа

- 1 – клавіша внутрішньої розгортки;
- 2 – клавіша розгортки по каналу А;
- 3 – клавіша розгортки по каналу В;
- 4 – вікно встановлення множника коефіцієнта відхилення по осі Х;
- 5 – клавіша встановлення повноекранного режиму вікна осцилографа;
- 6 – вікно зсуву зображення по осі Х;
- 7 – клемка для активації очікувального режиму;
- 8 – клемка "Земля" осцилографа;
- 9, 20 – вікно встановлення множника коефіцієнта відхилення по осі Y для каналів В і А відповідно;
- 10, 15 – клемки вхідного сигналу для каналів В і А відповідно;
- 11, 16 – вікна зсуву зображення по осі Y для каналів В і А відповідно;
- 12, 17 – клавіші для встановлення закритого режиму по входу для каналів В і А відповідно;
- 13, 18 – клавіші закорочення входу осцилографа на землю для каналів В і А відповідно;
- 14, 19 – клавіші для встановлення відкритого режиму по входу для каналів В і А відповідно.

Для дослідження перехідної характеристики рекомендується використовувати режим роботи осцилографа "АС" (відкривий вхід), оскільки досліджуватиметься прямокутний сигнал зі зміною амплітуди від 0 до заданого значення.

На передній панелі розміщені також регулятори зміщення зображення по горизонталі (X position) та по вертикалі (Y position).

Отримавши відповідні графіки на екранах приладів (АЧХ і ФЧХ на вимірювачі частотних характеристик, перехідну характеристику — на осцилографі), наводимо курсор на вікно Display Graphs основної панелі і натискаємо ліву клавішу маніпулятора. На екрані дисплея з'являється розгорнуте зображення графіка, після чого його можна роздрукувати, задавши оптимальний масштаб по осях.

Додаток Б
Приклад оформлення результатів моделювання

1 Моделювання частотних характеристик

1.1 Моделювання частотних характеристик RC-кола.

Початкові дані: $R = 1,5 \text{ кОм}$, $C = 20 \text{ нФ}$, $U_{\text{вх}} = 1 \text{ В}$, $f_{\text{out}} = 10 \text{ кГц}$.

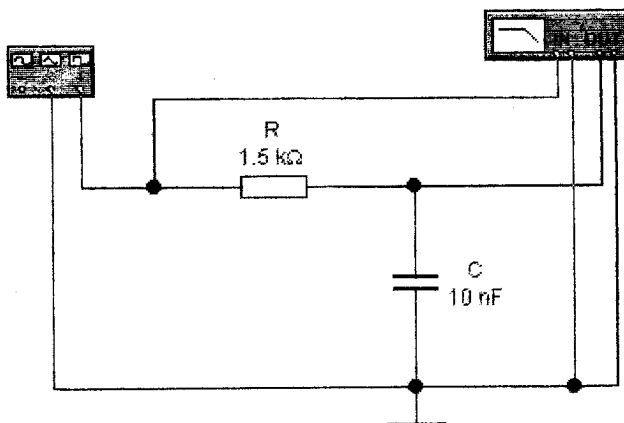


Рисунок 1 – Модель схеми експерименту

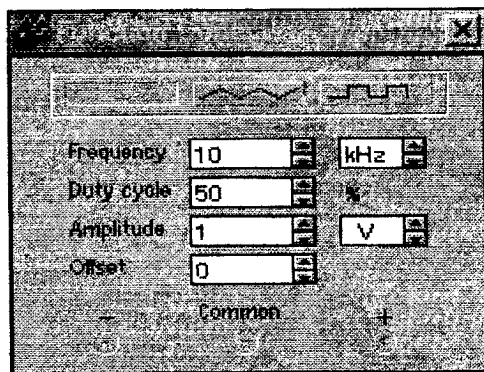


Рисунок 2 – Передня панель функціонального генератора

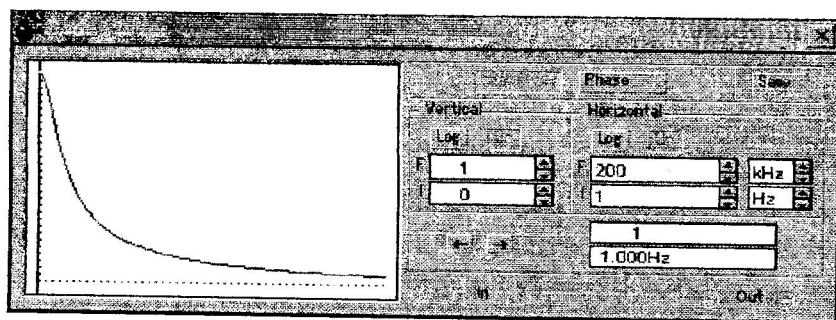


Рисунок 3 – Передня панель вимірювача частотних характеристик (АЧХ)

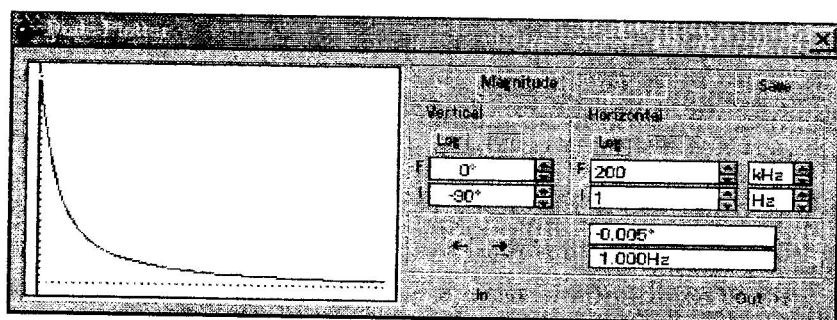
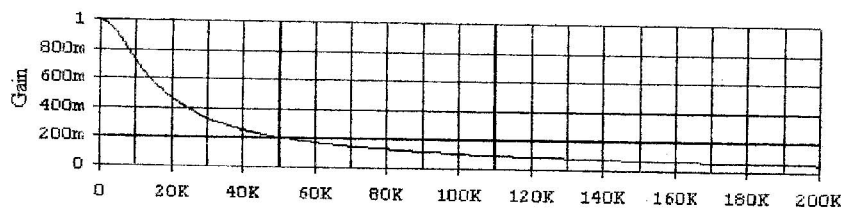
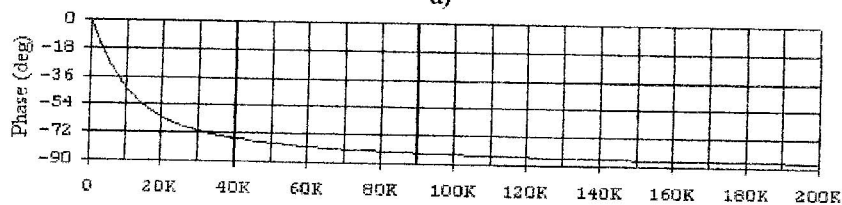


Рисунок 4 – Передня панель вимірювача частотних характеристик (ФЧХ)



а)



б)

Рисунок 5 – Моделі АЧХ і ФЧХ RC-кола

2 Моделювання перехідної характеристики

2.1 Моделювання перехідної характеристики RC-кола

Початкові дані: $R = 1,5 \text{ кОм}$, $C = 20 \text{ нФ}$, $U_{\text{вх}} = 1 \text{ В}$, $f_{\text{оп}} = 10 \text{ кГц}$.

При моделюванні перехідної характеристики заданого кола необхідно перемкнути режим роботи функціонального генератора з гармонічного на режим прямокутних імпульсів.

При дослідженні форми перехідної характеристики встановити відкритий режим роботи осцилографа по входу (АС).

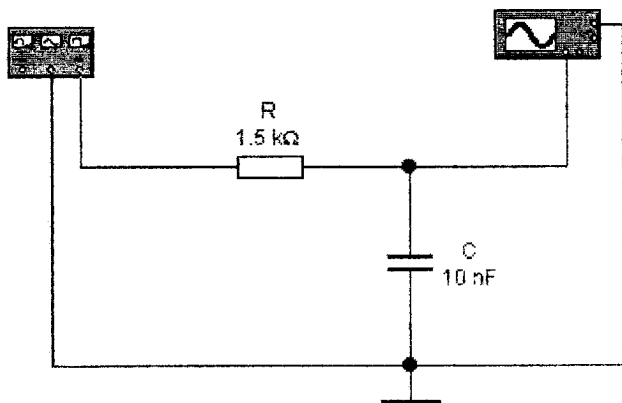


Рисунок 6 – Модель схеми експерименту.

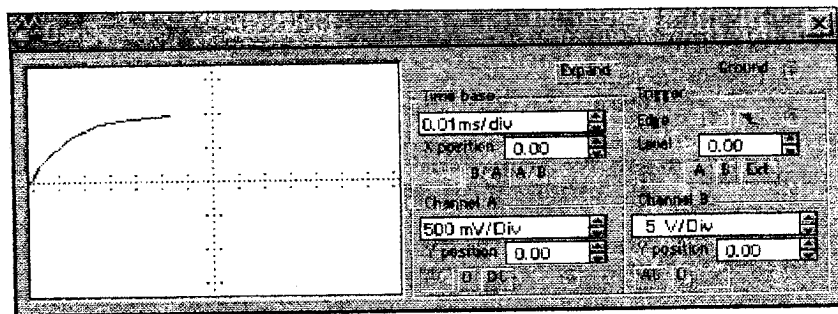


Рисунок 7 – Передня панель осцилографа.

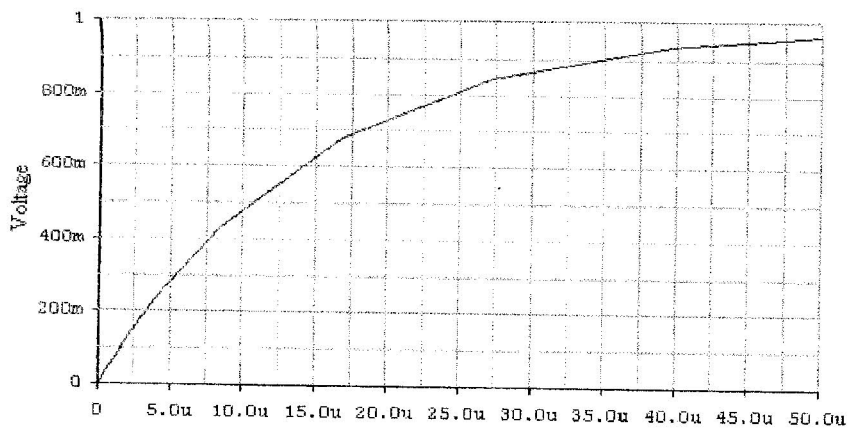


Рисунок 8 – Модель переходної характеристики RC-кола.

Додаток В
Приклад оформлення звіту до п'ятої лабораторної роботи

Вінницький національний технічний університет
Інститут радіотехніки, зв'язку і приладобудування

Факультет радіотехніки і телекомунікацій
Кафедра радіотехніки

Дослідження частотних характеристик електричних кіл
Лабораторна робота №5
з навчальної дисципліни „Основи радіоелектроніки”
Тривалість — 6 ак. годин

Виконали ст. гр. МА-00

Байлюк В.Р.
Канок Т.П.
Заруба В.М.
Ковалик Т.С.

Перевірив доц. каф. РТ
Куцевол М.О.

2001

Мета роботи – визначити експериментально частотні характеристики RL- і RC-кіл, розрахувати їх аналітичні вирази, побудувати теоретичні графічні залежності, змоделювати їх за допомогою ЕОМ та порівняти між собою.

1 Короткі теоретичні відомості

Залежність величин, що характеризують процеси в електричному колі, від частоти називають частотними характеристиками даного кола.

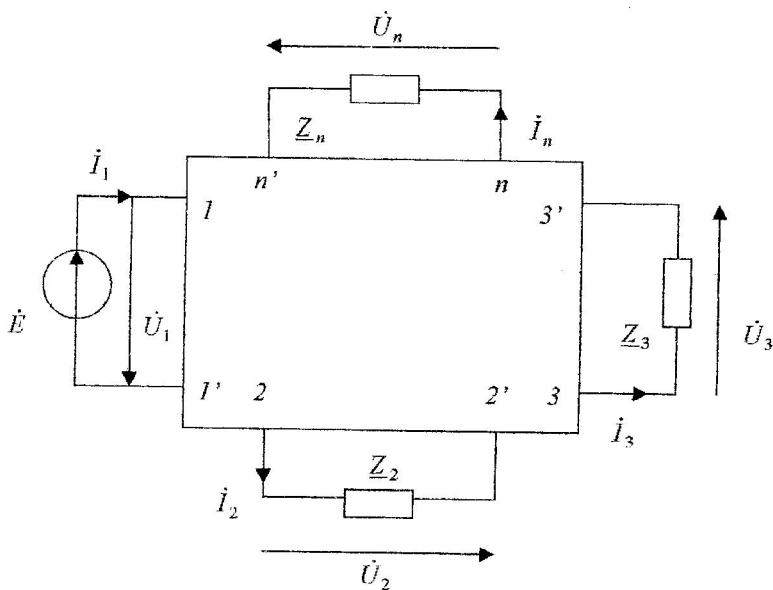


Рисунок 1 – Узагальнене зображення електричного кола у вигляді багатополосника

Будь-яка схема може бути подана у вигляді пасивного багатополосника (рис.1), з якого виділені джерела зовнішньої дії і ті пасивні елементи, на яких необхідно дослідити відгуки на ці дії.

Інколи полюси 1-1', до яких під'єднане джерело зовнішньої дії, називаються вхідними. Полюси 2-2', 3-3', ..., n-n', на яких визначається відгук, називаються вихідними.

Нехай зовнішня дія – гармонічна величина

$$x(t) = X_m \cos(\omega t + \psi_x)$$

і її комплексне зображення в діапазоні частот

$$\dot{X} = \dot{X}_m \cdot e^{j\omega t}$$

Тоді відгук на цю дію в опорі Z_m буде

$$y(t) = Y_m(\omega) \cdot \cos(\omega t + \psi_y),$$

а його комплексне зображення:

$$\dot{Y} = \dot{Y}_m(\omega) \cdot e^{j\omega t},$$

де: $\dot{X}_m = X_m \cdot e^{j\psi_x}$ - комплексна амплітуда вхідної дії;

$\dot{Y}_m(\omega) = Y_m(\omega) \cdot e^{j\psi_y(\omega)}$ - комплексна амплітуда вихідної дії, модуль і аргумент якої залежить від частоти.

Комплексною частотною характеристикою (КЧХ) кола називають відношення комплексного відгуку до комплексної вхідної дії:

$$F(j\omega) = \frac{\dot{Y}}{\dot{X}} = \frac{Y_m(\omega) \cdot e^{j\psi_y(\omega)} \cdot e^{j\omega t}}{X_m \cdot e^{j\psi_x} \cdot e^{j\omega t}} = \frac{Y_m(\omega) \cdot e^{j\psi_y(\omega)}}{X_m \cdot e^{j\psi_x}} =$$

$$= \frac{Y_m(\omega)}{X_m} \cdot e^{j[\psi_y(\omega) - \psi_x]} = F(\omega) \cdot e^{j\varphi(\omega)}, \quad (1)$$

де $F(\omega) = \frac{Y_m(\omega)}{X_m}$ - амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) кола;

$\varphi(\omega) = \psi_y(\omega) - \psi_x$ - фазо-частотна характеристика (ФЧХ) кола.

АЧХ і ФЧХ кола можуть бути представлені графіками або таблицями числових значень.

Аналітичний вираз КЧХ часто називають комплексною частотною функцією. Якщо відома КЧХ, то відгук $\dot{Y}_m(\omega)$ його на зовнішню дію X_m знаходять з виразу:

$$\dot{Y}_m(\omega) = F(j\omega) \cdot \dot{X}_m. \quad (2)$$

Частотні характеристики поділяються на вхідні і передатні.

Якщо відгуком на вхідну напругу \dot{U}_{m1} в діапазоні частот є вхідний струм $\dot{I}_{m1}(\omega)$, тоді комплексна частотна характеристика

$$\dot{Y}_{cx}(j\omega) = \frac{\dot{I}_{m1}(\omega)}{\dot{U}_{m1}} = \frac{I_{m1}(\omega)}{U_{m1}} \cdot e^{j[\psi_I(\omega) - \psi_U]} = Y_{cx}(\omega) \cdot e^{j\varphi_y(\omega)}$$

називається вхідною провідністю досліджуваного кола.

У випадку, коли відгуком є вхідна напруга при заданому вхідному струмі, маємо залежність

$$Z_{cx}(j\omega) = \frac{\dot{U}_{m1}(\omega)}{\dot{I}_{m1}} = \frac{U_{m1}(\omega)}{I_{m1}} \cdot e^{j[\psi_U(\omega) - \psi_I]} = Z_{cx}(\omega) \cdot e^{j\varphi_Z(\omega)},$$

яка називається вхідним опором.

Вхідний опір та вхідну провідність кола можна знаходити методом еквівалентних перетворень (рис.2)

$$Z_{ax}(j\omega) = Z_1 + \frac{Z_2 \cdot Z_3}{Z_2 + Z_3}; \quad Y_{ax}(j\omega) = \frac{1}{Z_{ax}(j\omega)} \quad (3)$$

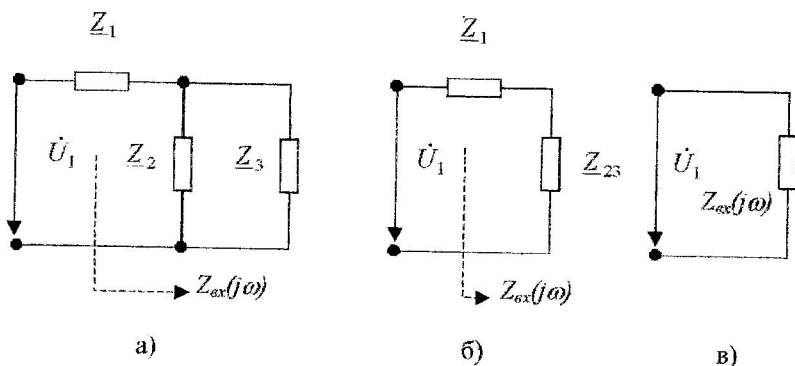


Рисунок 2 – Послідовність знаходження вхідного опору методом еквівалентних перетворень.

Якщо відгук на вхідну дію визначають на полюсах 2-2', 3-3', ..., n-n', то комплексна частотна характеристика називається передатною характеристикою.

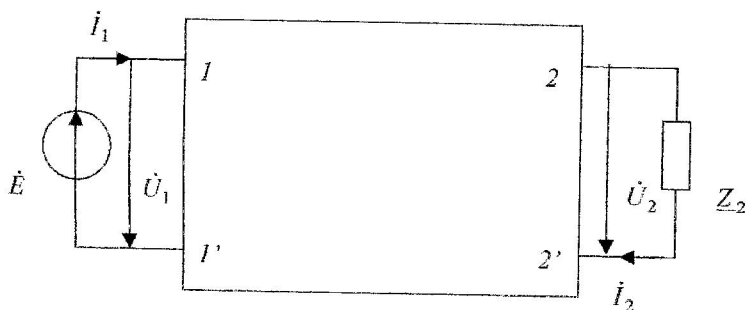


Рисунок 3 – Узагальнена схема електричного кола з вхідними 1-1' і вхідними 2-2' полюсами.

Для схеми (рис.3) можливі чотири різновиди передатних характеристик:

1) вхідна дія - \dot{U}_{m1} , а вихідна - $\dot{I}_{m2}(\omega)$. Комплексна частотна характеристика в цьому випадку називається передатною провідністю:

$$Y_{21}(j\omega) = \frac{\dot{I}_{m2}(\omega)}{\dot{U}_{m1}} = \frac{I_{m2}(\omega)}{U_{m1}} \cdot e^{j[\psi_{I_2}(\omega) - \psi_{U_1}]} = Y_{21}(\omega) \cdot e^{j\varphi_{Y_{21}}(\omega)}; \quad (4)$$

2) вхідна дія - \dot{I}_{m1} , а вихідна $\dot{U}_{m2}(\omega)$. При цьому КЧХ:

$$Z_{21}(j\omega) = \frac{\dot{U}_{m2}(\omega)}{\dot{I}_{m1}} = \frac{U_{m2}(\omega)}{I_{m1}} \cdot e^{j[\psi_{U_2}(\omega) - \psi_{I_1}]} = Z_{21}(\omega) \cdot e^{j\varphi_{Z_{21}}(\omega)} \quad (5)$$

і називається передатним опором;

3) вхідна дія - \dot{U}_{m1} , а вихідна $\dot{U}_{m2}(\omega)$. Тоді КЧХ буде такою:

$$K_U(j\omega) = \frac{\dot{U}_{m2}(\omega)}{\dot{U}_{m1}} = \frac{U_{m2}(\omega)}{U_{m1}} \cdot e^{j[\psi_{U_2}(\omega) - \psi_{U_1}]} = K_U(\omega) \cdot e^{j\varphi_{K_U}(\omega)} \quad (6)$$

і називається передатною характеристикою по напрузі;

4) вхідна дія - \dot{I}_{m1} , вихідна - $\dot{I}_{m2}(\omega)$. Тоді КЧХ:

$$K_I(j\omega) = \frac{\dot{I}_{m2}(\omega)}{\dot{I}_{m1}} = \frac{I_{m2}(\omega)}{I_{m1}} \cdot e^{j[\psi_{I_2}(\omega) - \psi_{I_1}]} = K_I(\omega) \cdot e^{j\varphi_{K_I}(\omega)} \quad (7)$$

і називається передатною характеристикою по струму.

Розглянемо схему електричного кола з послідовним з'єднанням активного R і реактивного X опорів (рис.4) та знайдемо його частотні характеристики ($X > 0$):

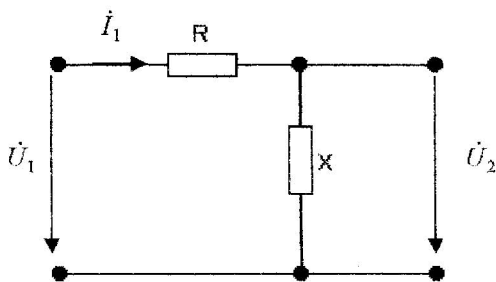


Рисунок 4 – Схема електричного кола з послідовним з'єднанням активного і реактивного опорів.

а) вхідний опір:

$$Z_{\text{вх}}(j\omega) = R + j \cdot X = \sqrt{R^2 + X^2} \cdot e^{j \cdot \arctg \frac{X}{R}} = Z_{\text{вх}}(\omega) \cdot e^{j \cdot \varphi_{\text{вх}}(\omega)};$$

б) вхідна провідність:

$$Y_{\text{вх}}(j\omega) = \frac{1}{Z_{\text{вх}}(j\omega)} = \frac{1}{Z_{\text{вх}}(\omega)} \cdot e^{-j \cdot \varphi_{\text{вх}}(\omega)} = Y_{\text{вх}}(\omega) \cdot e^{-j \cdot \varphi_{\text{вх}}(\omega)};$$

в) передатний опір:

$$Z_{21}(j\omega) = \frac{\dot{U}_{m2}(\omega)}{\dot{I}_{m1}}; \quad \dot{U}_{m2} = \dot{I}_{m1}(\omega) \cdot j \cdot X;$$

$$\dot{I}_{m1}(\omega) = \frac{\dot{U}_{m1}}{Z_{\text{вх}}(j\omega)} = \frac{U_{m1} \cdot e^{j \cdot 0^\circ}}{\sqrt{R^2 + X^2} \cdot e^{j \cdot \arctg \frac{X}{R}}};$$

$$\dot{U}_{m2}(\omega) = \frac{U_{m1} \cdot j \cdot X}{\sqrt{R^2 + X^2} \cdot e^{j \cdot \arctg \frac{X}{R}}};$$

$$Z_{21}(j\omega) = j \cdot X = X \cdot e^{j \cdot 90^\circ};$$

г) передатна характеристика за напругою:

$$K_U(j\omega) = \frac{\dot{U}_{m2}(\omega)}{\dot{U}_{m1}};$$

$$K_U(\omega) = \frac{j \cdot X}{\sqrt{R^2 + X^2} \cdot e^{j \cdot \arctg \frac{X}{R}}} = \frac{X}{\sqrt{R^2 + X^2}} \cdot e^{j \left(90^\circ - \arctg \frac{X}{R} \right)}.$$

2 Домашнє завдання

2.1 Знайти аналітичні вирази $K_U(j\omega)$ досліджуваних схем і побудувати теоретичні графіки їх модулів і аргументів для заданих значень R, L і C .

2.2 За допомогою моделювальної програми Electronics Workbench отримати моделі АЧХ і ФЧХ цих схем.

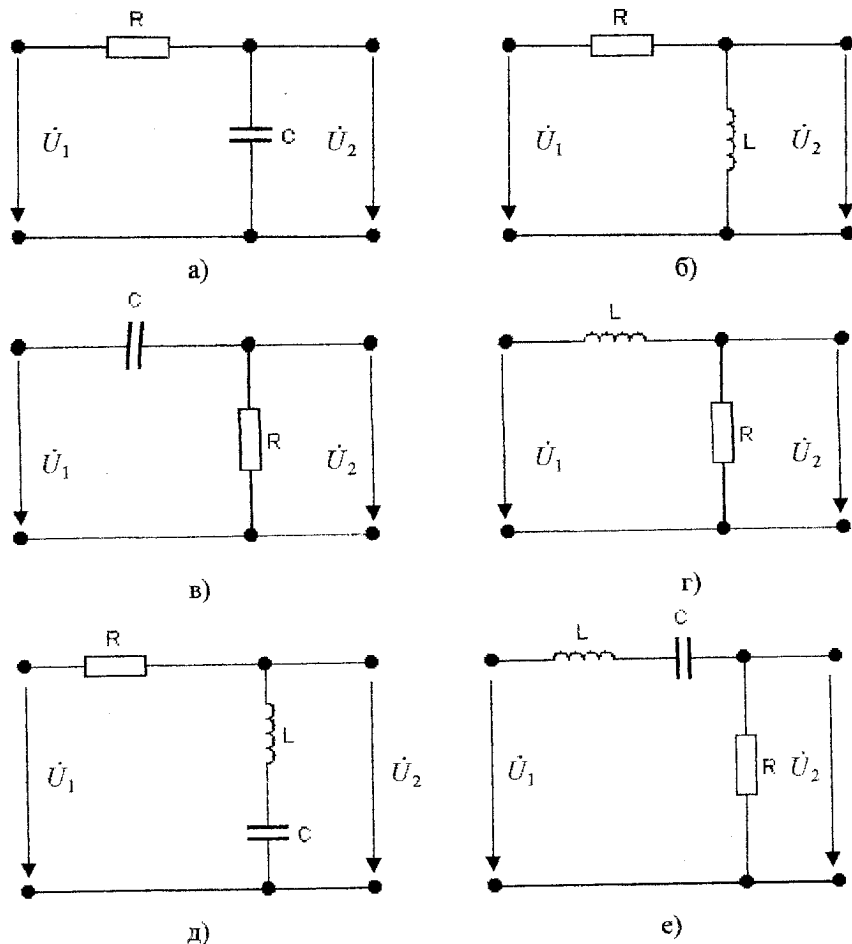
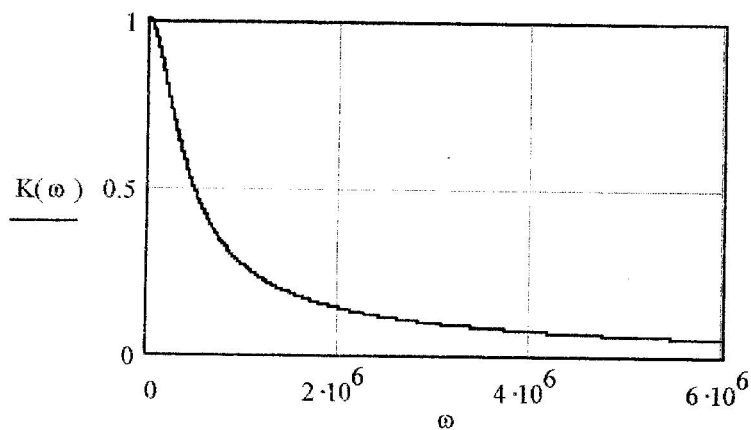


Рисунок 5 – Досліджувані схеми.

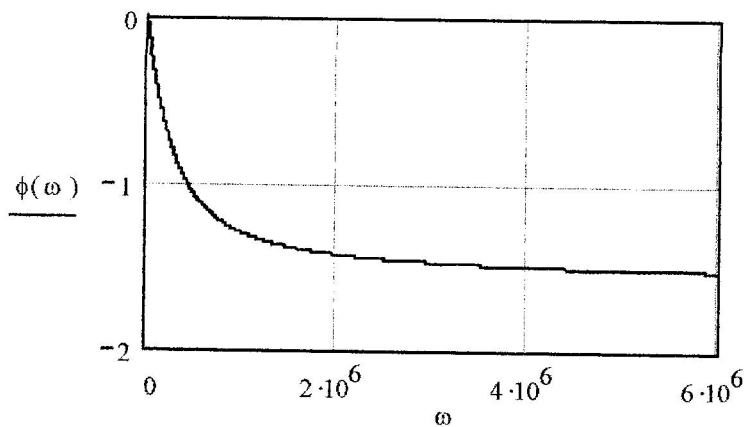
2.1.1 Коло RC (рис.5, а).

$R = 120 \text{ Ом}; L = 200 \text{ мкГн}; C = 30 \text{ нФ}.$

$$K(j\omega) = \frac{1}{R + \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C}} = \frac{1}{1 + j \cdot \omega \cdot R \cdot C}$$



а)



б)

Рисунок 6 – АЧХ і ФЧХ RC-кола

2.1.2 Коло RL (рис.5, б).

$$K(j\omega) = \frac{j \cdot \omega \cdot L}{R + j \cdot \omega \cdot L}$$

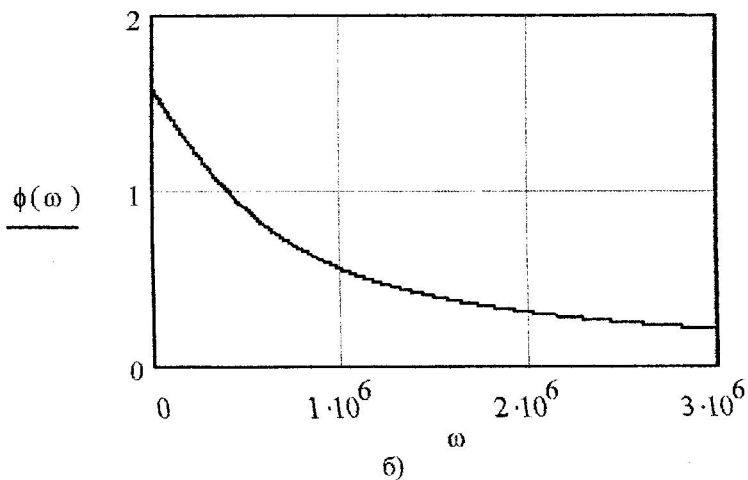
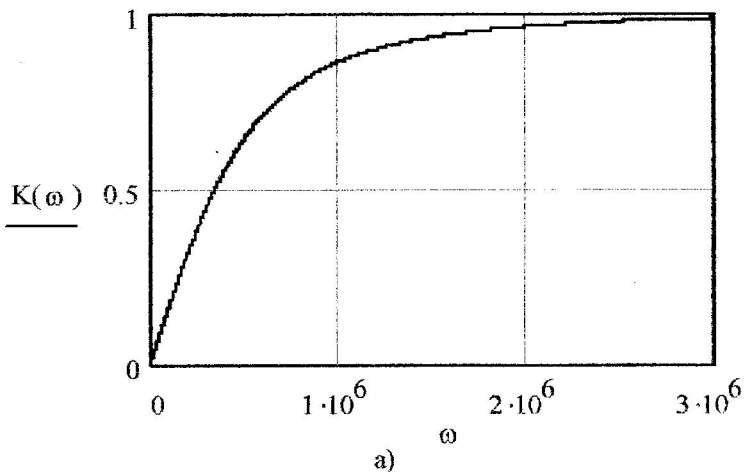
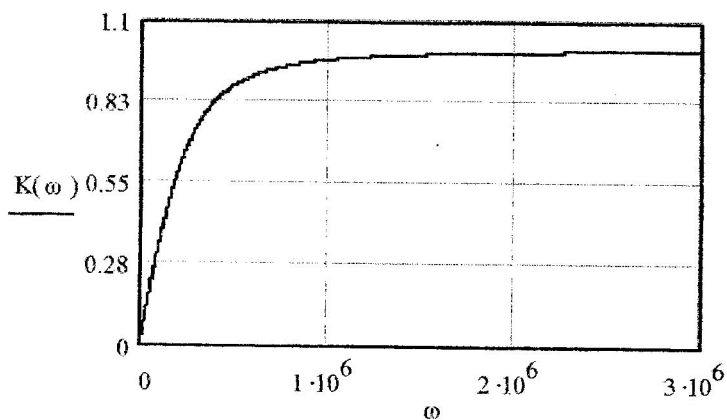


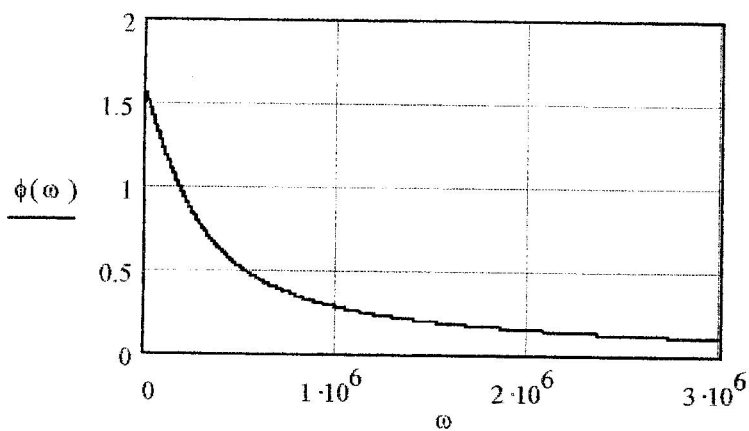
Рисунок 7 – АЧХ і ФЧХ RL-кола

2.1.3 Коло CR (рис. 5, в).

$$K(j\omega) = \frac{R}{R + \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C}} = \frac{j \cdot \omega \cdot C \cdot R}{1 + j \cdot \omega \cdot C \cdot R}$$



а)

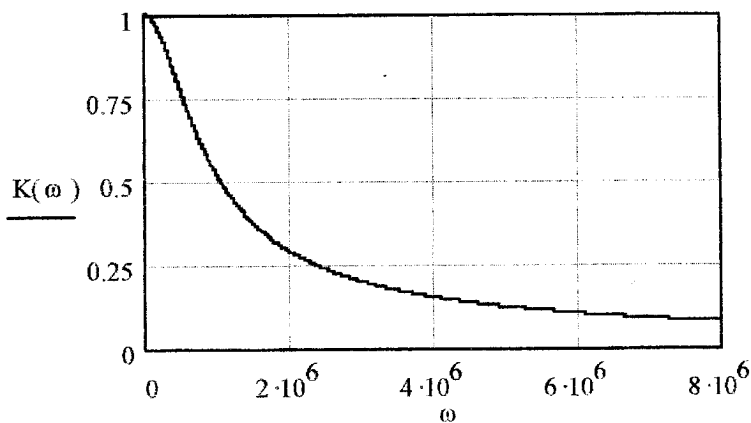


б)

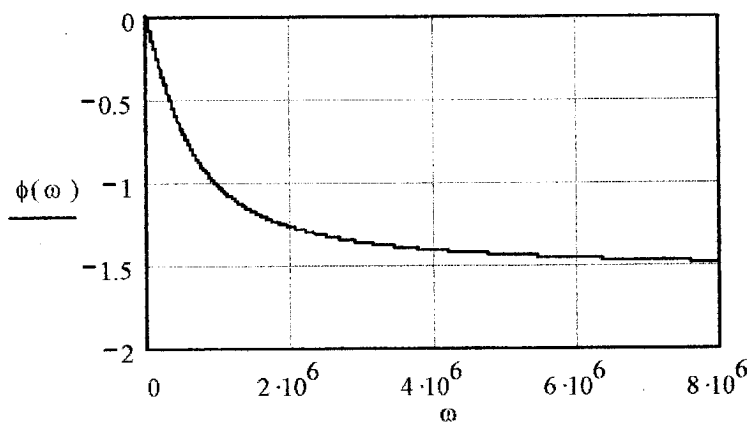
Рисунок 8 – АЧХ і ФЧХ CR-кола

2.1.4 Коло LR (рис.5, г).

$$K(j\omega) = \frac{R}{R + j \cdot \omega \cdot L}$$



а)

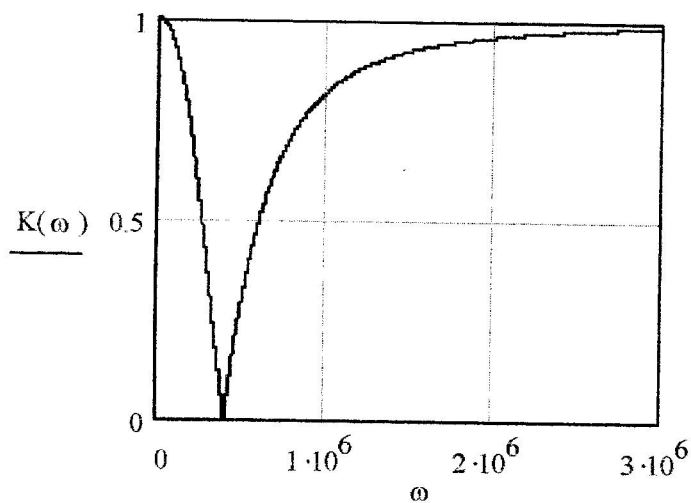


б)

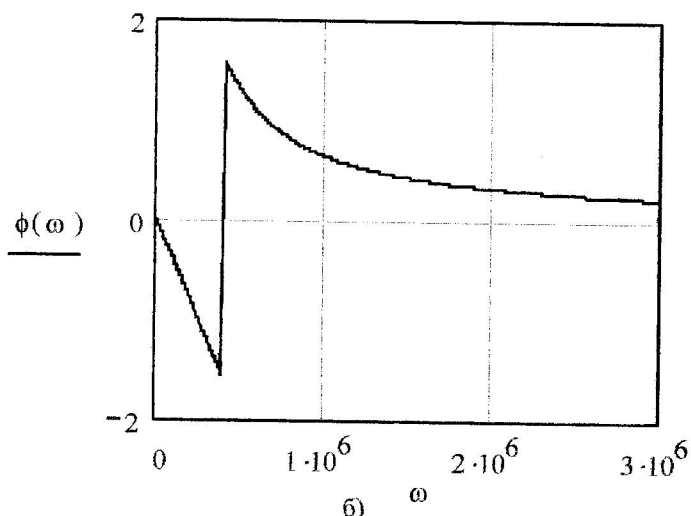
Рисунок 9 – АЧХ і ФЧХ LR-кола

2.1.5 Коло RLC (рис.5, д).

$$K(j\omega) = \frac{j \cdot \left(\omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C} \right)}{R + j \cdot \left(\omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C} \right)} = \frac{1 - \omega^2 \cdot L \cdot C}{(1 - \omega^2 \cdot L \cdot C) + j \cdot \omega \cdot R \cdot C}$$



а)

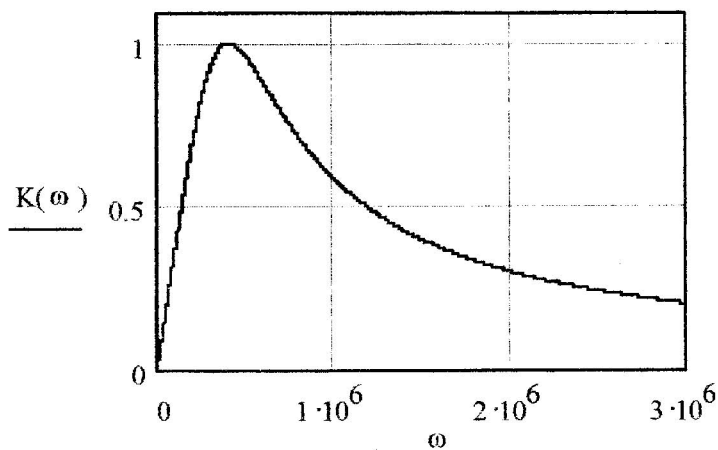


б)

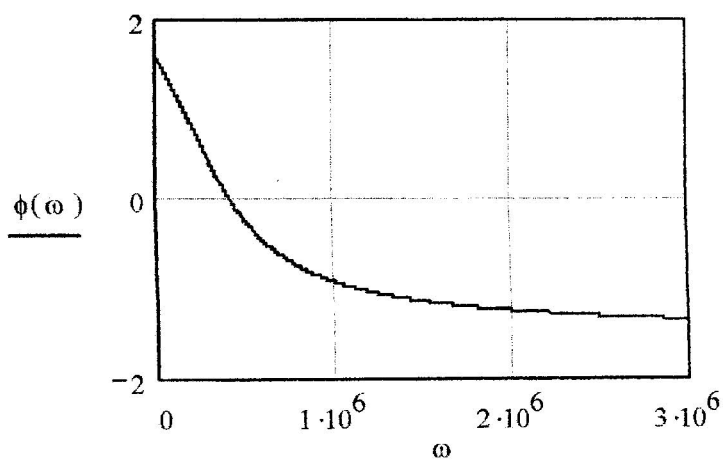
Рисунок 10 – АЧХ і ФЧХ RLC-кола

2.1.6 Коло LCR (рис.5, е).

$$K(j\omega) = \frac{R}{R + j \cdot \left(\omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C} \right)} = \frac{j \cdot \omega \cdot R \cdot C}{(1 - \omega^2 \cdot L \cdot C) + j \cdot \omega \cdot R \cdot C}$$



а)

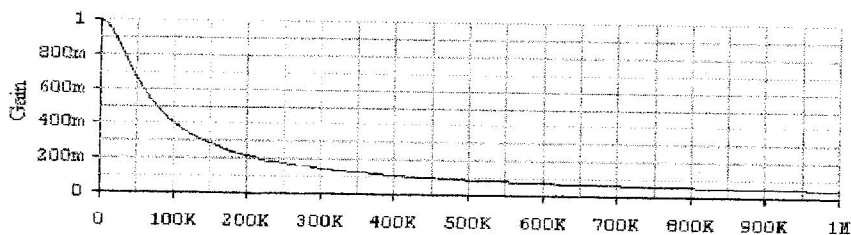


б)

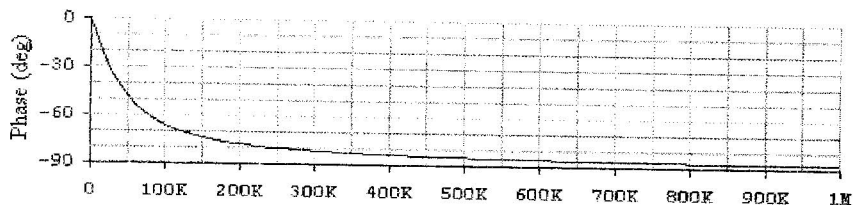
Рисунок 11 – АЧХ і ФЧХ LCR-кола

2.2.1 Коло RC (рис.5, а).

$R = 120 \text{ Ом}; L = 200 \text{ мкГн}; C = 30 \text{ нФ}.$



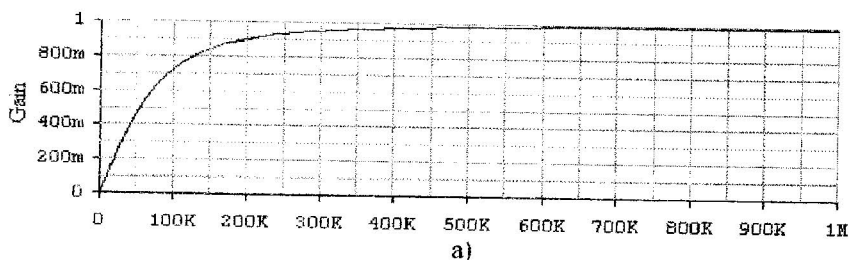
a)



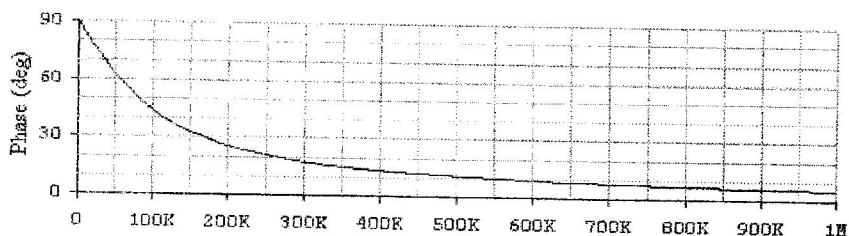
б)

Рисунок 12 – Модель АЧХ і ФЧХ RC-кола

2.2.2 Коло RL (рис.5, б).



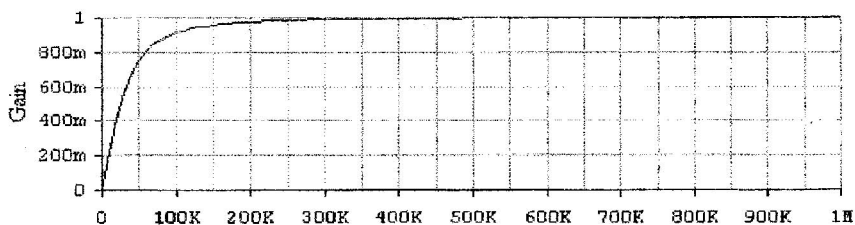
a)



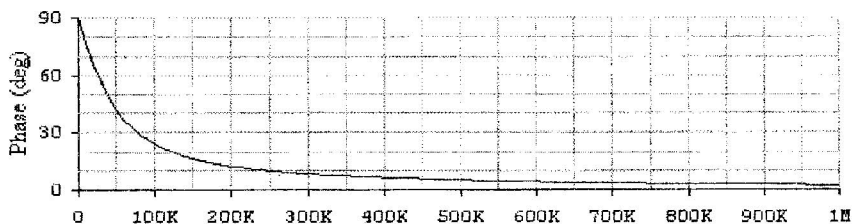
б)

Рисунок 13 – Модель АЧХ і ФЧХ RL-кола

2.2.3 Коло CR (рис.5, в).



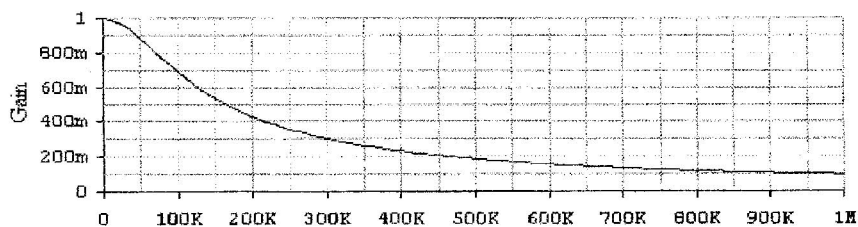
а)



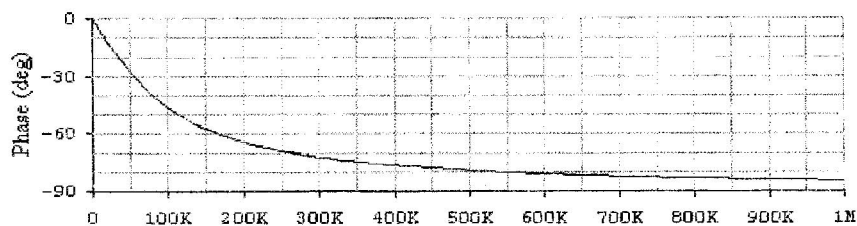
б)

Рисунок 14 – Модель АЧХ і ФЧХ CR-кола

2.2.4 Коло LR (рис.5, г).



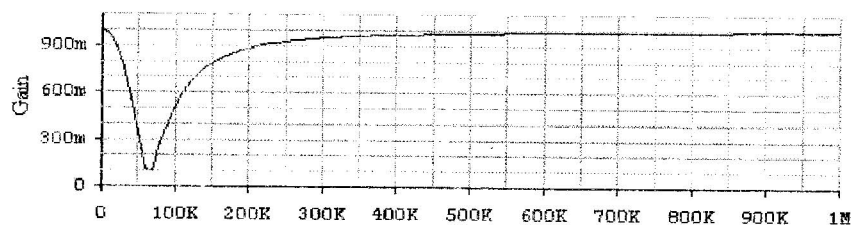
а)



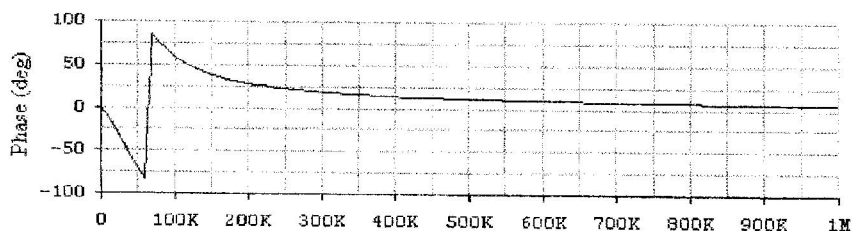
б)

Рисунок 15 – Модель АЧХ і ФЧХ LR-кола

2.2.5 Коло RLC (рис.5, д).



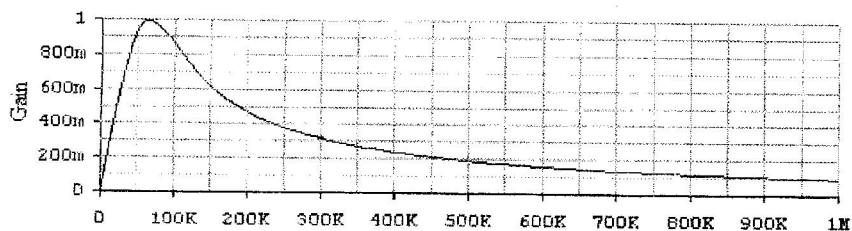
а)



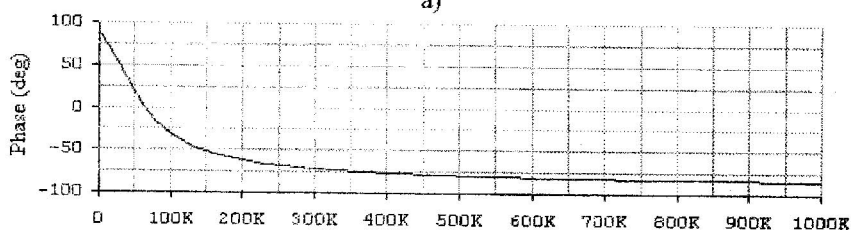
б)

Рисунок 16 – Модель АЧХ і ФЧХ RLC-кола

2.2.6 Коло LCR (рис.5, е).



а)



б)

Рисунок 17 – Модель АЧХ і ФЧХ LCR-кола

3 Порядок виконання роботи.
 3.1 Дослідження RC-кола (рис.5, а).

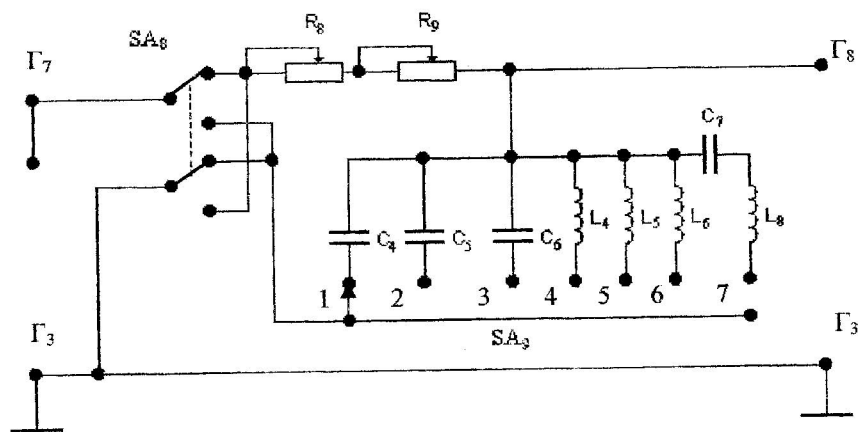


Рисунок 18

Таблиця 1

$f, \text{кГц}$		0,001	1	2	3	4	5	6	7	
U_2	$R = R_1$	$C = C_4$	1	1	1	1	0,99	0,99	0,99	
		$C = C_5$	1	1	1	0,99	0,998	0,997	0,996	0,994
		$C = C_6$	1	0,999	0,997	0,993	0,989	0,982	0,975	0,967
	$R = R_2$	$C = C_4$	1	0,996	0,992	0,981	0,97	0,954	0,936	0,916
		$C = C_5$	1	0,985	0,97	0,933	0,89	0,85	0,8	0,76
		$C = C_6$	1	0,92	0,85	0,74	0,62	0,55	0,47	0,42

Продовження таблиці 1

$f, \text{кГц}$		8	9	10	20	50	100	150	200	
U_2	$R = R_1$	$C = C_4$	0,998	0,998	0,997	0,989	0,936	0,798	0,625	0,553
		$C = C_5$	0,993	0,991	0,989	0,957	0,798	0,553	0,464	0,315
		$C = C_6$	0,957	0,948	0,936	0,787	0,469	0,256	0,178	0,131
	$R = R_2$	$C = C_4$	0,893	0,872	0,847	0,623	0,303	0,157	0,111	0,079
		$C = C_5$	0,71	0,67	0,62	0,37	0,16	0,08	0,053	0,04
		$C = C_6$	0,37	0,34	0,3	0,16	0,06	0,03	0,022	0,016

3.2 Дослідження RL-кола (рис.5, б).

Таблиця 2

$f, \text{кГц}$		0,001	1	2	3	4	5	6	7	
U_2	$R = R_1$	$L = L_4$	0	0,03	0,063	0,093	0,125	0,153	0,185	0,212
		$L = L_5$	0	0,062	0,125	0,183	0,244	0,3	0,35	0,4
		$L = L_6$	0	0,121	0,244	0,4	0,45	0,52	0,6	0,65
	$R = R_2$	$L = L_4$	0	0	0,013	0,019	0,025	0,031	0,038	0,046
		$L = L_5$	0	0,013	0,025	0,037	0,05	0,062	0,075	0,087
		$L = L_6$	0	0,025	0,05	0,074	0,1	0,12	0,15	0,17

Продовження таблиці 2

$f, \text{кГц}$		8	9	10	20	50	100	150	200	
U_2	$R = R_1$	$L = L_4$	0,244	0,27	0,3	0,53	0,84	0,95	0,97	0,98
		$L = L_5$	0,45	0,49	0,53	0,78	0,95	0,98	0,985	0,99
		$L = L_6$	0,71	0,74	0,78	0,93	0,98	0,99	0,99	1
	$R = R_2$	$L = L_4$	0,05	0,056	0,063	0,125	0,3	0,53	0,66	0,78
		$L = L_5$	0,1	0,11	0,125	0,24	0,53	0,78	0,88	0,93
		$L = L_6$	0,2	0,22	0,24	0,45	0,78	0,93	0,95	0,98

3.3 Дослідження CR-кола (рис.5, в).

Таблиця 3

$f, \text{кГц}$		0,001	1	2	3	4	5	6	7	
U_2	$R = R_1$	$C = C_4$	0	0,007	0,015	0,022	0,03	0,037	0,045	0,05
		$C = C_5$	0	0,015	0,03	0,045	0,06	0,074	0,09	0,104
		$C = C_6$	0	0,037	0,075	0,11	0,15	0,18	0,22	0,25
	$R = R_2$	$C = C_4$	0	0,06	0,125	0,18	0,24	0,3	0,35	0,4
		$C = C_5$	0	0,12	0,24	0,34	0,45	0,52	0,6	0,65
		$C = C_6$	0	0,26	0,53	0,65	0,78	0,83	0,88	0,91

Продовження таблиці 3

$f, \text{кГц}$			8	9	10	20	50	100	150	200
U_2	$R = R_1$	$C = C_4$	0,06	0,067	0,075	0,15	0,35	0,6	0,71	0,83
		$C = C_5$	0,12	0,13	0,15	0,29	0,6	0,83	0,87	0,95
		$C = C_6$	0,29	0,32	0,35	0,6	0,88	0,97	0,98	0,99
	$R = R_2$	$C = C_4$	0,45	0,49	0,53	0,78	0,95	0,988	0,998	1
		$C = C_5$	0,71	0,74	0,78	0,93	0,988	0,99	1	1
		$C = C_6$	0,93	0,94	0,95	0,988	0,99	1	1	1

3.4 Дослідження LR-кола (рис.5, г).

Таблиця 4

$f, \text{кГц}$			0,001	1	2	3	4	5	6	7
U_2	$R = R_1$	$L = L_4$	1	1	1	0,995	0,992	0,988	0,983	0,977
		$L = L_5$	1	1	0,992	0,981	0,97	0,954	0,936	0,916
		$L = L_6$	1	0,985	0,97	0,93	0,89	0,85	0,798	0,76
	$R = R_2$	$L = L_4$	1	1	1	1	1	1	0,997	0,996
		$L = L_5$	1	1	1	1	1	0,997	0,996	0,995
		$L = L_6$	1	1	1	0,997	0,995	0,992	0,986	0,985

Продовження таблиці 4

$f, \text{кГц}$			8	9	10	20	50	100	150	200
U_2	$R = R_1$	$L = L_4$	0,97	0,963	0,954	0,85	0,54	0,303	0,243	0,157
		$L = L_5$	0,893	0,872	0,847	0,623	0,303	0,157	0,121	0,08
		$L = L_6$	0,71	0,67	0,62	0,37	0,157	0,08	0,058	0,04
	$R = R_2$	$L = L_4$	0,995	0,994	0,993	0,992	0,954	0,847	0,722	0,623
		$L = L_5$	0,994	0,993	0,992	0,97	0,847	0,623	0,495	0,37
		$L = L_6$	0,98	0,976	0,97	0,893	0,623	0,37	0,248	0,195

3.5 Дослідження RLC-кола (рис.5, д).

Таблиця 5

$f, \text{кГц}$			0,001	1	4	8	12	14	16	18
U_2	$R = R_1$	1	0,99	0,98	0,92	0,77	0,62	0,42	0,17	
	$R = R_2$	1	0,96	0,75	0,44	0,23	0,156	0,09	0,034	

Продовження таблиці 5

$f, \text{кГц}$		20	25	30	35	40	50	100	200
U_2	$R = R_1$	0,086	0,52	0,74	0,83	0,89	0,94	0,987	1
	$R = R_2$	0,017	0,12	0,22	0,288	0,36	0,47	0,77	0,93

3.6 Дослідження LCR-кола (рис.5, е).

Таблиця 6

$f, \text{кГц}$		0,001	1	4	8	12	15	16	18
U_2	$R = R_1$	0	0,04	0,18	0,38	0,64	0,78	0,91	0,986
	$R = R_2$	0	0,2	0,67	0,9	0,973	0,99	1	1

Продовження таблиці 6

$f, \text{кГц}$		20	25	30	35	40	50	100	200
U_2	$R = R_1$	0,996	0,85	0,67	0,56	0,46	0,35	0,163	0,08
	$R = R_2$	1	0,99	0,98	0,96	0,93	0,88	0,64	0,37

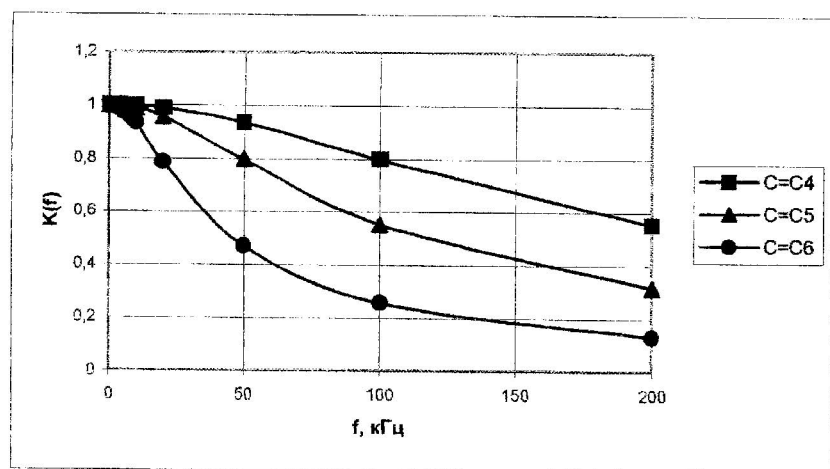


Рисунок 19 – Сімейство залежностей $K(f)$ RC-кола при різних значеннях C і при значенні $R = R_2$

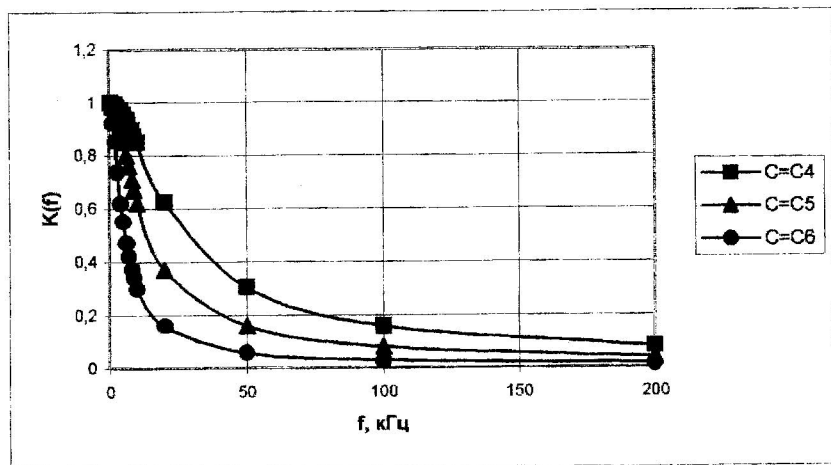


Рисунок 20 – Сімейство залежностей $K(f)$ RC-кола при різних значеннях C і при значенні $R = R_2$

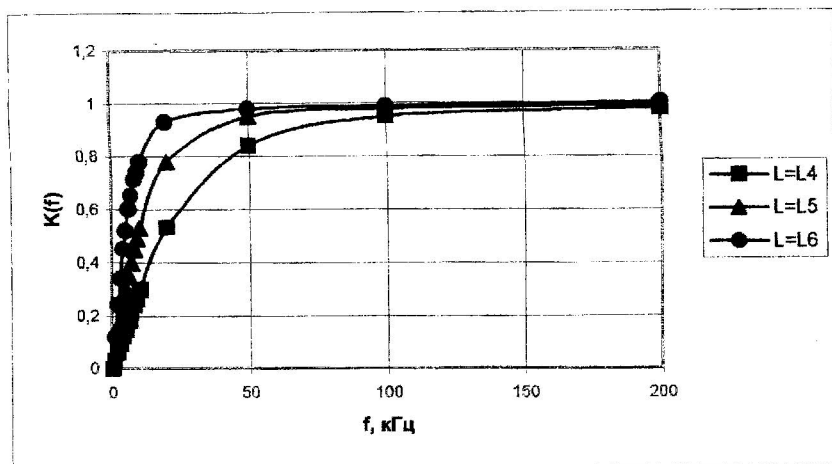


Рисунок 21 – Сімейство залежностей $K(f)$ RL-кола при різних значеннях L і при значенні $R = R_2$

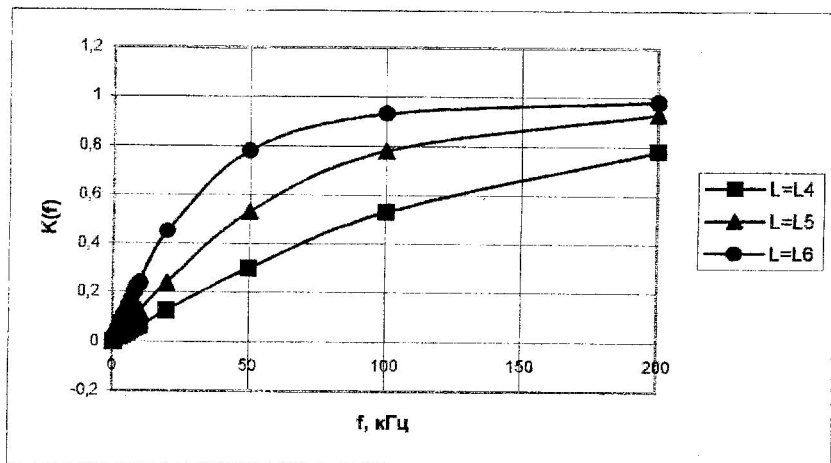


Рисунок 22 – Сімейство залежностей $K(f)$ RL-кола при різних значеннях L і при значенні $R = R_2$

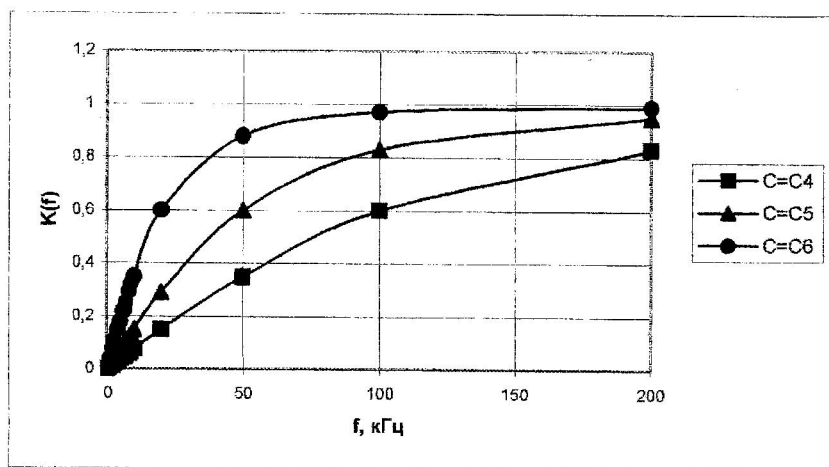


Рисунок 23 – Сімейство залежностей $K(f)$ CR-кола при різних значеннях C і при значенні $R = R_1$

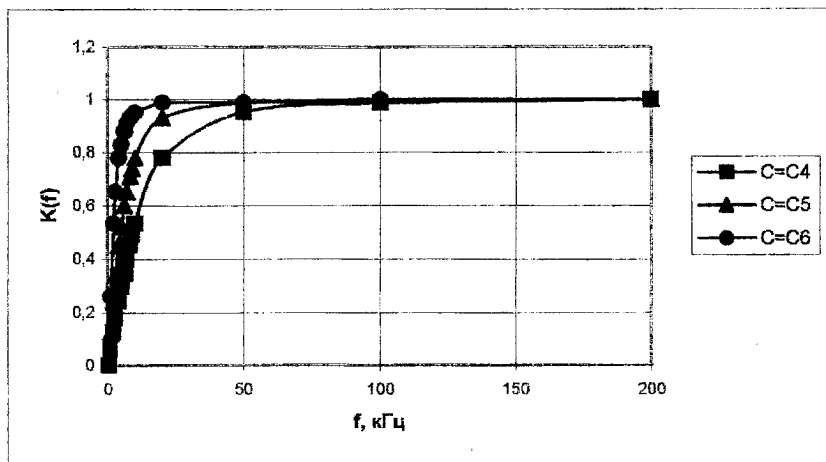


Рисунок 24 – Сімейство залежностей $K(f)$ CR-кола при різних значеннях C і при значенні $R = R_2$

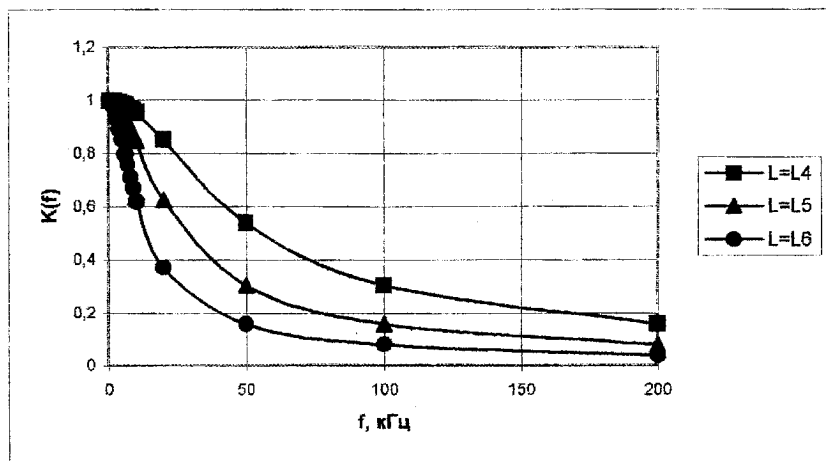


Рисунок 25 – Сімейство залежностей $K(f)$ LR-кола при різних значеннях L і при значенні $R = R_1$

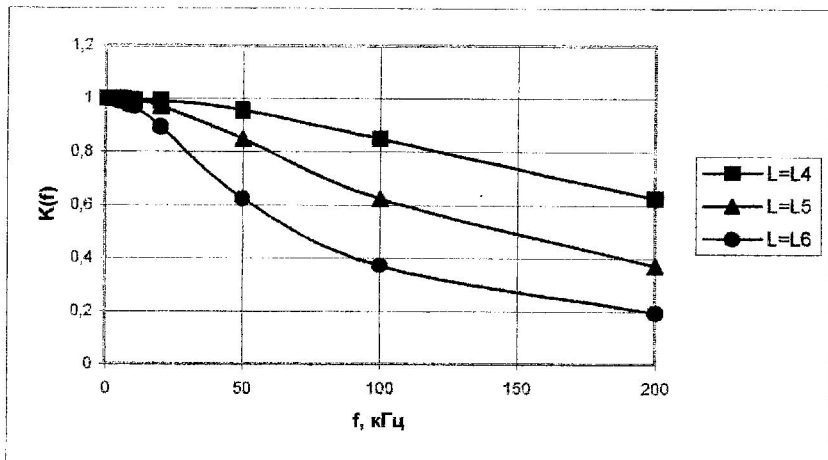


Рисунок 26 – Сімейство залежностей $K(f)$ LR-кола при різних значеннях L і при значенні $R = R_2$

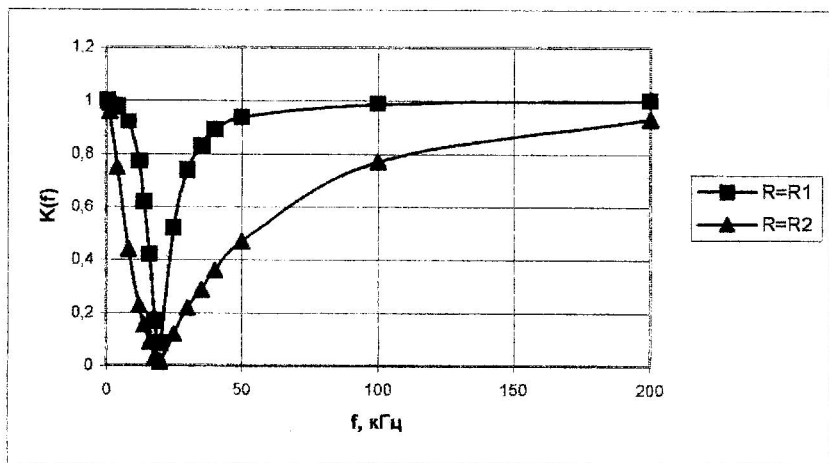


Рисунок 27 – Сімейство залежностей $K(f)$ RLC-кола при різних значеннях опору R

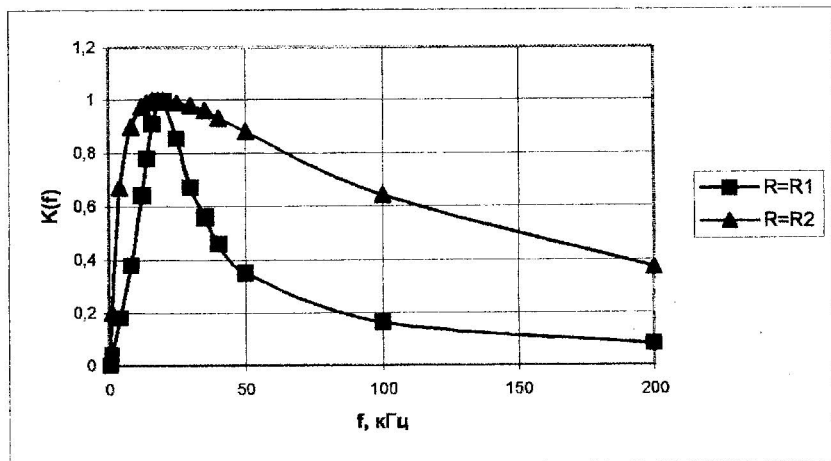


Рисунок 28 – Сімейство залежностей $K(f)$ LCR-кола при різних значеннях опору R

ВИСНОВКИ

В роботі були досліджені частотні характеристики простих і складних електричних кіл. Дослідження проводились в три етапи:

- 1) шляхом теоретичного аналізу під час виконання домашнього завдання;
- 2) експериментальним шляхом із застосуванням прямих і непрямих вимірювань;
- 3) шляхом моделювання на ЕОМ.

Як видно з отриманих результатів та графічних залежностей, теоретичні і модельовані графіки повністю збігаються. В основному збіглися і експериментальні залежності. Відмінності можна віднести на рахунок великих суб'єктивних похибок дослідників.

Всі досліджувані кола виявили фільтруючі властивості і є фільтрами нижніх і верхніх частот. Послідовне RLC коло виявило ознаки загороджувального фільтра, а LCR коло – смугового фільтра.

Зміна постійної часу кола призводить до зміни смуги пропускання фільтрів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Атабеков Г.И. Основы теории цепей. Учеб. для вузов. – М.: Энергия, 1969.
2. Зевеке Г. В., Ионкин П. А., Нетушил А. В. и др. Основы теории цепей. – М.: Высшая школа, 1975.
3. Зернов Н. В., Карпов В. Г. Теория радиотехнических цепей. – Л.: Энергия, 1972.
4. Баскаков С. И. Радиотехнические цепи и сигналы: Учеб. для вузов по спец. «Радиотехника». – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1988.
5. Гоноровский И. С. Радиотехнические цепи и сигналы. – М.: Энергия, 1986.
6. Методичні рекомендації до лабораторних робіт з курсу «Теорія кіл та сигналів» для студентів бакалаврату спеціальності 6.0910 триступенєвої підготовки спеціалістів з вищою інженерною освітою всіх форм навчання. (Уклад. М. О. Кудевол, О. П. Похилок, В. М. Студенікін. – Вінниця, ВДТУ, 1994 – 68 с. Укр. мовою).
7. Теорія кіл і сигналів. Лабораторний практикум: Навчальний посібник / М.О. Кудевол – В.: ВДТУ, 1998.

Навчальне видання

Микола Олександрович Куцевол
Олег Миколайович Куцевол

Основи радіоелектроніки
Частина 2
Лабораторний практикум

Оригінал-макет підготовлено Куцеволом М. О.

Редактор Т. О. Старічек

Навчально-методичний відділ ВНТУ
Свідоцтво Держкомінформу України
серія ДК № 746 від 25.12.2001р.
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ВНТУ

Підписано до друку 2.08.2005р.

Формат 29,7×42 $\frac{1}{4}$

Друк різнографічний

Тираж 75 прим.

Зам. № 2005 - 137

Гарнітура Times New Roman

Папір офсетний

Ум. друк. арк. 6.81

Віддруковано в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі
Вінницького національного технічного університету
Свідоцтво Держкомінформу України
серія ДК № 746 від 25.12.2001 р.
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ВНТУ