

Лабораторна робота 5

Частотні характеристики найпростіших електричних кіл

1. Мета роботи

Розрахунок і експериментальна перевірка амплітудно-частотних і фазочастотних характеристик лінійних електричних кіл першого і другого порядку.

2. Основні теоретичні положення

Комплексної частотної характеристикою (КЧХ) електричного кола називається відношення комплексних зображень реакції і впливу:

$$H_{kv}(j\omega) = \frac{\dot{Y}_{mk}}{\dot{X}_{mv}} = \frac{\dot{Y}_k}{\dot{X}_v}, \quad (5.1)$$

де \dot{Y}_{mk} і \dot{Y}_k – комплексна амплітуда і комплексне діюче значення реакції кола; \dot{X}_{mv} і \dot{X}_v – комплексна амплітуда і комплексне діюче значення впливу; k – номер вихідних затискачів; v – номер вхідних затискачів.

Розмірність КЧХ дорівнює відношенню розмірностей реакції і впливу. Залежно від того, які величини (струми або напруги) розглядаються в якості реакції кола і зовнішнього впливу, КЧХ може мати розмірність опору, провідності або бути безрозмірною. В залежності від того, на яких затискачах розглядаються дані величини (на одних і тих же або на різних), КЧХ діляться на вхідні і передаточні (див. табл. 5.1).

Залежність модуля КЧХ від частоти:

$$H_{kv}(\omega) = |H_{kv}(j\omega)| = \frac{Y_k(\omega)}{X_v(\omega)}, \quad (5.2)$$

називається амплітудно-частотною характеристикою (АЧХ) кола, а залежність аргументу КЧХ від частоти:

$$\varphi_{kv}(\omega) = \arg H_{kv}(j\omega) = \varphi_k(\omega) - \varphi_v(\omega), \quad (5.3)$$

називається фазочастотною характеристикою (ФЧХ).

В разі графічного представлення комплексних частотних характеристик кола зазвичай будують окремо АЧХ і ФЧХ. Також КЧХ можна зобразити у вигляді однієї залежності – годографа або амплітудно-фазової характеристики (АФХ) на комплексній площині. Годограф КЧХ – крива, що є геометричним місцем кінців вектора $H(\omega)$, значення якого відповідають зміни частоти від $\omega = 0$ до $\omega = \infty$.

Таблиця. 5.1 – Види комплексних частотних характеристик

Тип	Найменування	Позначення	Вплив	Реакція
вхідні	вхідний опір	$Z_{vv}(j\omega)$	\dot{I}_v	\dot{U}_v
	вхідна провідність	$Y_{vv}(j\omega)$	\dot{U}_v	\dot{I}_v
передаточні	коефіцієнт передачі по напрузі	$K_{kv}(j\omega)$ або $K_U(j\omega)$	\dot{U}_v	\dot{U}_k
	коефіцієнт передачі по струму	$G_{kv}(j\omega)$ або $K_i(j\omega)$	\dot{I}_v	\dot{I}_k
	передаточний опір	$Z_{kv}(j\omega)$	\dot{I}_v	\dot{U}_k
	передаточна провідність	$Y_{kv}(j\omega)$	\dot{U}_v	\dot{I}_k

Знання КЧХ дозволяє визначити реакцію кола на заданий вплив:

$$\dot{Y}_{mk} = H_{kv}(j\omega)\dot{X}_{mv} \quad (5.4)$$

або

$$\dot{Y}_k = H_{kv}(j\omega)\dot{X}_v \quad (5.5)$$

При цьому АЧХ представляє собою відношення амплітуд або діючих значень реакції і зовнішнього впливу, а ФЧХ - різниця початкових фаз реакції і впливу.

КЧХ лінійних кіл не залежать від амплітуди і початкової фази зовнішнього впливу, а визначаються структурою кола і параметрами елементів, що входять до неї і можуть бути розраховані по комплексній схемі заміщення кола з використанням відомих методів розрахунку. Наприклад, комплексний коефіцієнт передачі по напрузі послідовного кола, який містить два опори (рис. 5.1), може бути визначений наступним чином.

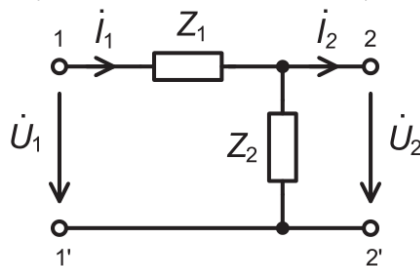


Рис.5.1 – Еквівалентна схема дільника напруги

У режимі холостого ходу, коли струм $\dot{I}_2 = 0$,

$$K_U(j\omega) = K_{12}(j\omega) = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} = \frac{i_1 Z_2}{\dot{U}_1} = \frac{\left[\dot{U}_1 / (Z_1 + Z_2) \right] Z_2}{\dot{U}_1} = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2}. \quad (5.6)$$

Якщо в якості Z_1 використовується опір, а в якості Z_2 ємність (рис. 5.2, а), то $Z_1 = R$, $Z_2 = 1/j\omega C$ отримаємо:

$$K_U(j\omega) = \frac{1/j\omega C}{R + 1/j\omega C} = \frac{1}{1 + j\omega CR}. \quad (5.7)$$

Оскільки модуль відношення дорівнює відношенню модулів, а аргумент дорівнює різниці аргументів чисельника і знаменника, вирази для АЧХ і ФЧХ матимуть вигляд:

$$K_U(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega CR)^2}}, \quad \varphi_U(\omega) = -\arctg(\omega CR). \quad (5.8)$$

На практиці в якості аргументу частотних характеристик зручніше використовувати частоту $f = 1/T$, де T – період, тоді $\omega = 2\pi f$.

Частотою зрізу кола називають частоту, при якій значення АЧХ зменшується в певне число раз від максимального значення. Як правило, частоту зрізу визначають по рівню $1/\sqrt{2} \approx 0,707$ (або - 3 дБ в логарифмічному масштабі) від максимуму. В даному випадку максимум АЧХ спостерігається при $\omega = 0$, $K_U(0) = 1$, з ростом частоти АЧХ монотонно убуває, прагнучи до нуля при $\omega = \infty$, і частота зрізу $\omega_{зр} = 1/RC$ або $f_{зр} = 1/2\pi RC$.

3. Розрахункова частина

Дані для розрахунків знаходяться в таблиці в лабораторії.

3.1. Вивести формули для комплексного коефіцієнта передачі по напрузі:

$$K_U(j\omega) = K_{21}(j\omega) \quad (5.9)$$

для кіл першого порядку, зображених на рис.5.2 і нехтуючи опором втрат котушки R_L .

3.2. Вивести формули для АЧХ і ФЧХ зазначених кіл.

3.3. Розрахувати і побудувати графіки АЧХ $K_U(f)$ і ФЧХ $\varphi_U(f)$ електричних кіл першого порядку (RC , CR , RL , LR). Розрахунок і побудову графіків необхідно виконувати в лінійному масштабі в діапазоні частот від f_{min} до f_{max} , що відповідає зміні АЧХ від максимального значення K_{max} до значення приблизно $0,1K_{max}$.

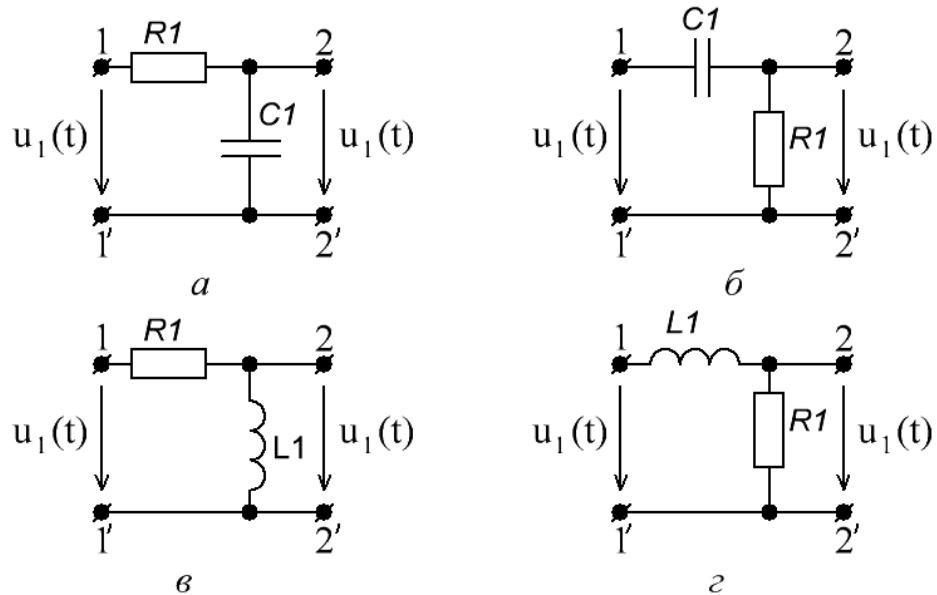


Рис.5.2. Схеми досліджуваних кіл першого порядку:

а) RC , б) CR , в) RL , г) LR

3.4. Розрахувати і позначити на графіках значення частот зрізу $f_{зр}$.

3.5. Вивести формули для комплексного коефіцієнта передачі по напрузі:

$$K_U(j\omega) = K_{21}(j\omega). \quad (5.10)$$

для кола другого порядку, зображеного на рис.5.3 і нехтуючи опором втрат котушки R_L .

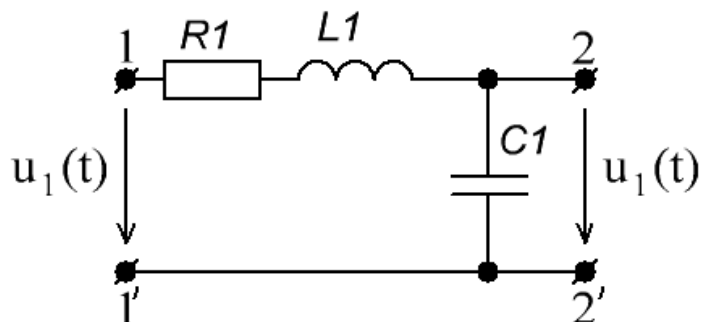


Рис.5.3 – Електричне коло другого порядку

3.6. Вивести формули для АЧХ і ФЧХ RLC -кола.

3.7. За виведеними формулами розрахувати і побудувати графіки АЧХ $K_U(f)$ і ФЧХ $\varphi_U(f)$ RLC -кола.

Розрахунок і побудову графіків виконати для трьох значень опору $R = 2R_{кр}$, $R = R_{кр}$, та $R = 0,5R_{кр}$, де $R_{кр} = 2\sqrt{L/C}$. Графіки необхідно побудувати в лінійному масштабі в діапазоні частот від 0 до f_{max} , де f_{max} – частота, що відповідає значенню АЧХ на рівні $0,1K_U(0)$, де $K_U(0)$ – значення АЧХ при $f = 0$.

3.8. За графіками визначити значення частот зрізу $f_{зр}$ для кожного значення R .

4. Експериментальна частина

4.1. Дослідити кола першого порядку

4.1.1. За допомогою універсального вольтметра заміряти опір потенціометра R , встановити його номінал заданому значенню; виміряти опір втрат котушки R_L , порівняти його із табличним значенням.

4.1.2. Зібрати схему для вимірювання АЧХ і ФЧХ (рис. 5.4). В якості досліджуваного кола підключіть RC -коло (рис. 5.2, а).

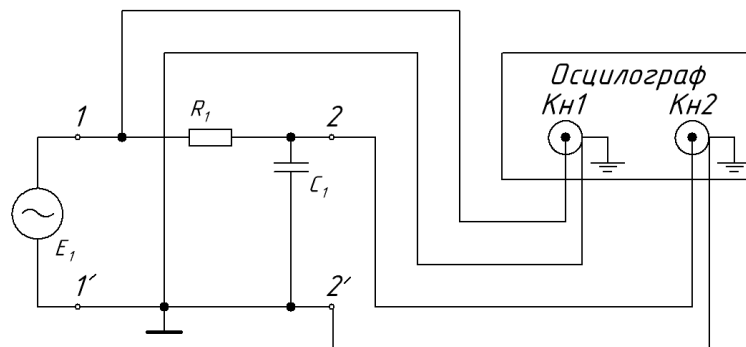


Рис.5.4 – Схема для вимірювання АЧХ і ФЧХ

4.1.3. Після перевірки схеми викладачем включите живлення приладів, встановити на генераторі параметри впливу: сигнал – гармонійний, частота, близька до значення, при якому спостерігають максимальне значення АЧХ K_{max} (із розрахункової частини) для даної кола.

4.1.4. Встановити перемикачі роботи осцилографа: тип входу «AC/GND/DC» – «AC», режим роботи «MODE» – «DUAL», режим синхронізації «MODE» – «AUTO», джерело синхронізації «TRIGGER SOURCE» – «CH1». Переконайтеся, що на екрані осцилографа спостерігаються два гармонійних сигналу з періодом, що відповідає частоті генератора.

4.1.5. Встановити амплітуду сигналу на вході досліджуваного кола $U_{m1} = 5$ В (виміряти осцилографом в каналі 1). Змінюючи частоту, визначити діапазон

частот $f_{min} \dots f_{max}$, в якому відношення амплітуд на виході U_{m2} (канал 2) і на вході U_{m1} (канал 1) кола змінюється від K_{max} приблизно до $0,1K_{max}$, порівняти з діапазоном частот, отриманих в розрахунковій частині.

4.1.6. Змінюючи частоту від f_{min} до f_{max} із рівномірним кроком таким чином, щоб виконати 6-10 вимірювань, зробити вимірювання амплітуд на вході U_{m1} (канал 1) і на виході U_{m2} (канал 2) кола та часового зсуву t_3 між сигналами для кожного значення частоти. Якщо сигнал в каналі 2 відстає від сигналу в каналі 1, то t_3 необхідно брати із знаком «-», якщо випереджає – із знаком «+». Результати вимірювань занести в таблицю 5.2.

Таблиця 5.2 – Результати вимірювань

f , кГц	f_{min}		f_{max}
U_{m1} , В			
U_{m2} , В			
t_3 , мкс			
$K_U(f)$			
$\varphi_U(f)$, град			

4.1.7. Повторити пункти 4.1.2 – 4.1.6 для CR -кола (рис. 5.2, б).

4.1.8. Повторити пункти 4.1.2 – 4.1.6 для RL -кола (рис. 5.2, в).

4.1.9. Повторити пункти 4.1.2 – 4.1.6 для LR -кола (рис. 5.2, г).

4.2. Дослідити кола другого порядку.

4.2.1. За допомогою універсального вольтметра встановити $R = 2R_{кр}$, (див.п.3.7). Вимірювання опору проводити в розібраної схемі.

4.2.2. Зібрати схему для вимірювання АЧХ і ФЧХ (рис. 5.4). В якості досліджуваного кола підключіть RLC -коло (рис. 5.3).

4.2.3. Після перевірки схеми викладачем включите живлення приладів, встановити на генераторі параметри впливу – гармонійний сигнал, частота (0,5-1) кГц, режим роботи осцилографа як написано в п. 4.1.4.

4.2.4. Встановити амплітуду сигналу на вході досліджуваної кола $U_{m1} = 5$ В (виміряти осцилографом в каналі 1). Перевірити, що амплітуди сигналів на виході U_{m2} (канал 2) і на вході U_{m1} (канал 1) кола однакові, а часовий зсув t_3 між сигналами дорівнює нулю, в іншому випадку зменшити частоту генератора. Змінюючи частоту, знайти значення f_{max} , при якому відношення $U_{m2}/U_{m1} \approx 0,1$. Порівняти результати із розрахованими даними.

4.2.5. Змінюючи частоту від (0,5-1) кГц до f_{max} , з рівномірним кроком таким чином, щоб виконати 8-10 вимірювань, провести вимірювання амплітуд на вході U_{m1} (канал 1) і на виході U_{m2} (канал 2) кола та часового зсуву t_3 між

сигналами для кожного значення частоти. Результати вимірювань занести в таблицю, аналогічну п. 4.1.6.

4.2.6. Повторити пункти 4.2.2 – 4.2.5, встановивши $R = R_{кр}$.

4.2.7. Повторити пункти 4.2.2 – 4.2.5, встановивши $R = 0,5R_{кр}$.

5. Обробка результатів

5.1. За результатами вимірювань розрахувати АЧХ $K_U(f) = U_{m2}/U_{m1}$ і ФЧХ

$\varphi_U(f) = 2\pi f t_3$ [рад.] або $\varphi_U(f) = 360ft_3$ [град.] досліджуваних кіл, результати занести в таблицю (див. п. 4.1.6).

5.2. Побудувати графіки АЧХ і ФЧХ досліджуваних кіл.

5.3. За експериментальними графіками АЧХ визначити частоти зрізу, скласти таблицю порівняння результатів розрахунку і експерименту.

Таблиця 5.3 – Порівняння результатів розрахунку і експерименту

$f_{зр}$	RC	CR	RL	LR	RCL		
					$2R_{кр}$	$R_{кр}$	$0,5R_{кр}$
Розрахунок							
Експеримент							

5.4. Сформулювати висновки по виконаній роботі.

6. Контрольні питання

1. Що таке комплексна частотна характеристика кола? Які існують види КЧХ? Як визначається розмірність КЧХ?
2. Що таке амплітудно-частотна характеристика? Який її фізичний зміст?
3. Що таке фазочастотна характеристика? Який її фізичний сенс?
4. Якими властивостями володіють КЧХ лінійних кіл? Як розрахувати КЧХ кола?
5. Як визначити реакцію кола на заданий гармонічний вплив, якщо відома КЧХ?
6. Що таке частота зрізу?
7. Який вид мають КЧХ кіл, що складаються тільки із опорів?

8. Який вид мають КЧХ кіл, що містять один реактивний елемент (ємність або індуктивність)?
9. Які мають КЧХ кола, що містять різні реактивні елементи (ємність і індуктивність)?
10. Від чого залежить вид КЧХ послідовного *RLC*-кола і яким чином?