

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до лабораторних робіт

з дисципліни «Основи теорії кіл, сигналів та процесів в електроніці» на тему «Аналіз частотних і часових характеристик лінійних кіл»
для студентів усіх форм навчання
спеціальності 125 – «Кібербезпека та захист інформації»
галузі знань 12 – «Інформаційні технології»

Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни «Основи теорії кіл, сигналів та процесів в електроніці» на тему «Аналіз частотних і часових характеристик лінійних кіл» для студентів усіх форм навчання спеціальності 125 – Кібербезпека та захист інформації» галузі знань 12 – «Інформаційні технології» / Укл.: Л. М. Карпуков, Т. О. Жорж. – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2024. - 36 с.

Наведено методи аналізу частотних і часових характеристик лінійних кіл із застосуванням прикладних пакетів MathCAD та Electronics Workbench.

Укладачі: Л. М. Карпуков, професор, д. т. н.,
Т. О. Жорж, зав.лаб.

Рецензент: С. М. Романенко, доцент, к. ф.-м. н.

Відповідальний за випуск: А.В. Коротун, доц., канд. фіз.-матем. наук

Затверджено
на засіданні кафедри
інформаційної безпеки та
наноелектроніки
Протокол № 4
від 21.12.2023 р.

Рекомендовано до видання НМК
факультету інформаційної безпеки та
електронних комунікацій
Протокол № 5 від 24.02.2024 р.

ЗМІСТ

Лабораторна робота №1. Дослідження частотних характеристик кіл першого порядку.....	4
Лабораторна робота №2. Дослідження частотних характеристик коливального контуру.....	14
Лабораторна робота №3. Частотний аналіз розгалуженого електричного кола	19
Лабораторна робота №4. Дослідження часових характеристик кіл першого порядку.....	22
Перелік посилань	30
Додаток А. Варіанти електричних схем.....	31

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №1 ДОСЛІДЖЕННЯ ЧАСТОТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК КІЛ ПЕРШОГО ПОРЯДКУ

Мета роботи: розрахунок і дослідження амплітудно-частотної та фазо-частотної характеристик комплексного коефіцієнта передавання RC або RL - кіл.

ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Частотний аналіз лінійного кола (аналіз в частотній області) – це аналіз кіл на дію у вигляді гармонійного коливання, що змінюється згідно з законом

$$a(t) = A_m \cos(\omega t + \varphi) \quad (1.1)$$

або

$$a(t) = A_m \sin(\omega t + \varphi). \quad (1.2)$$

Тут A_m - амплітуда коливання;
 $\phi(t) = \omega t + \varphi$ - фаза коливання;
 φ - початкова фаза коливання (фаза при $t = 0$);
 $\omega = 2\pi f$ - кутова частота, рад/с;
 f – циклічна частота, Гц= $1/c$;
 $T = 1/f$ - період коливань, с.

При дії на лінійне коло гармонійним коливанням (1.1) струми і напруга в колі будуть змінюватися за аналогічним законом. Відбудеться зміна тільки амплітуд і початкових фаз, частота коливань не зміниться. Таким чином, завданням частотного аналізу кола є знаходження амплітуд і початкових фаз струмів і напруги на елементах кола для заданої частоти вхідної дії.

Математичною основою частотного аналізу є метод комплексних амплітуд, відповідно до якого гармонійне коливання представляється в комплексній формі:

$$\dot{A} = \dot{A}_m e^{j\omega t}. \quad (1.3)$$

Тут $\dot{A}_m = A_m e^{j\varphi}$ - комплексна амплітуда;

A_m - амплітуда коливання;

φ - початкова фаза коливання;

$j = \sqrt{-1}$ - уявна одиниця.

Зворотний перехід від символічного уявлення (1.3) до залежності від часу (1.1) проводиться за співвідношеннями:

$$a(t) = \operatorname{Re} \left[\left(A_m e^{j\varphi} \right) e^{j\omega t} \right] = A_m \cos(\omega t + \varphi), \quad (1.4)$$

$$a(t) = \operatorname{Im} \left[\left(A_m e^{j\varphi} \right) e^{j\omega t} \right] = A_m \sin(\omega t + \varphi). \quad (1.5)$$

Внаслідок лінійності перетворень за методом комплексних амплітуд має місце наступний зв'язок між математичними моделями R, C, L - елементів для часової і частотної областей:

$$u(t) = R i(t) \leftrightarrow \dot{U}_m = R \dot{I}_m, \quad (1.6)$$

$$i_C(t) = C \frac{du_C(t)}{dt} \leftrightarrow \dot{I}_{mC} = j\omega C \dot{U}_{mC}, \quad (1.7)$$

$$u_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} \leftrightarrow \dot{U}_{mL} = j\omega L \dot{I}_{mL}. \quad (1.8)$$

Аналіз кіл в частотній області проводиться за законами Кірхгофа і Ома, причому закон Ома для C, L - елементів записується у вигляді:

$$\dot{U}_{mC} = \dot{Z}_C \dot{I}_{mC}, \quad (1.9)$$

$$\dot{U}_{mL} = \dot{Z}_L \dot{I}_{mL}, \quad (1.10)$$

Тут $\dot{Z}_C = 1/(j\omega C)$, $\dot{Z}_L = j\omega L$ - реактивні опори.

Величини, зворотні реактивним опорам C, L - елементів, утворюють реактивну провідність: $\dot{Y}_C = j\omega C$, $\dot{Y}_L = 1/(j\omega L)$.

У загальному випадку ділянка кола характеризується комплексним опором $\dot{Z} = R + jX$, що складається з активного R і реактивного X опорів. Цей опір можна представити в показовій формі: $\dot{Z} = Z e^{j\varphi}$, де $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$ - модуль, $\varphi = \arg(\dot{Z}) = \arg tg(X/R)$ - аргумент комплексного числа.

При аналізі частотних характеристик коло представляється у вигляді чотирьохполосника, що має дві вхідних і дві вихідних клеми.

Однією з основних характеристик чотирьохполосників є комплексний коефіцієнт передачі по напрузі:

$$\dot{K} = \frac{\dot{U}_{m_2}}{\dot{U}_{m_1}}, \quad (1.11)$$

де \dot{U}_{m_1} , \dot{U}_{m_2} - комплексна амплітуда напруги на вході та виході чотирьохполосника, відповідно.

Залежність модуля $K(\omega) = |\dot{K}(\omega)|$ комплексного коефіцієнта передачі від частоти називається амплітудно-частотною характеристикою (АЧХ) чотирьохполосника, а залежність аргументу (фази) $\varphi(\omega) = \arg[\dot{K}(\omega)]$ комплексного коефіцієнта передачі від частоти називається фазо-частотною характеристикою (ФЧХ) чотирьохполосника.

В лабораторній роботі досліджуються схеми чотирьохполосників, представлені на рис. 1.1 - 1.4. Їх частотні властивості визначаються постійною часу кола τ_0 : $\tau_0 = L/R$ або $\tau_0 = RC$.

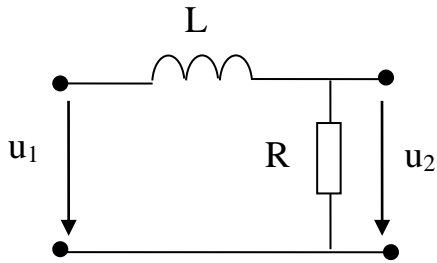


Рисунок 1.1

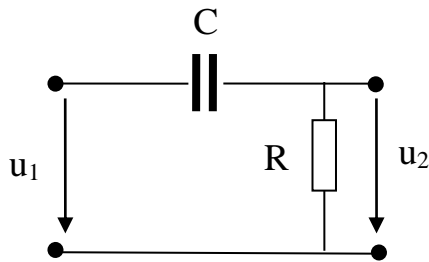


Рисунок 1.2

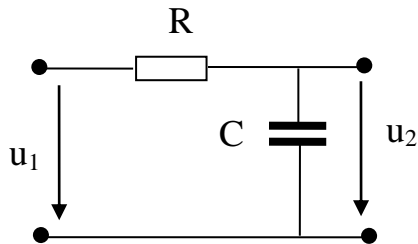


Рисунок 1.3

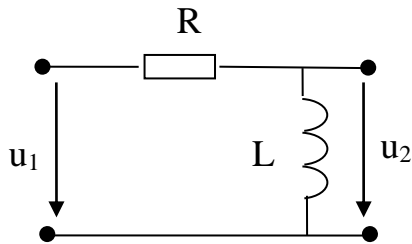


Рисунок 1.4

Комплексні коефіцієнти передачі схем, наведені на рисунках, мають наступний вид:

$$\dot{K}(\omega) = \frac{1}{1 + j\omega\tau_0}, \quad (1.12)$$

або

$$\dot{K}(\omega) = \frac{j\omega\tau_0}{1 + j\omega\tau_0}, \quad (1.13)$$

На частоті зрізу $\omega_3 = 1/\tau_0$ модуль коефіцієнта передачі зменшується в $\sqrt{2}$ рази щодо максимального значення, рівного одиниці.

На основі R,C або R,L –кіл складаються прості фільтри низьких частот (ФНЧ) або верхніх частот (ФВЧ). ФНЧ пропускає коливання низьких частот і затримує коливання високих частот. ФВЧ, навпаки, пропускає коливання високих частот і затримує коливання низьких частот. Частота зрізу ω_3 розділяє смуги пропускання і затримання.

Для частотного аналізу схем в системі Electronics Workbench використовується вимірювач АЧХ і ФЧХ (плоттер), який знаходиться в бункері з вимірювальними пристроями і переміщується на робочий стіл за допомогою миші. Вхід плоттера (клеми **IN**) підключається до входу схеми, вихід (**OUT**) – до виходу схеми. Вхід схеми позначається шляхом підключення джерела змінної напруги. Збільшення розмірів пристрою для перегляду результатів аналізу виконується подвійним натисненням миші. Зачепивши нею за полосу з назвою приладу його можна перемістити. У вихідне положення прилад повертається натисненням миші на символи – на його панелі та введенням команди **Close**.

Плоттер має наступні кнопки управління:

Magnitude – режим вимірювання АЧХ;

Phase – режим вимірювання ФЧХ;

Lin – лінійний масштаб;

Log – логарифмічний масштаб;

F – кінцеве значення інтервалу;

I – початкове значення інтервалу.

Прилад обладнано також кнопками управління візором для зняття чисельного значення частоти на горизонтальній вісі та відповідного йому значення характеристики, що вимірюється. АЧХ вимірюється в разях або децибелах, ФЧХ – в градусах. Візор можна переміщувати безпосередньо мишою.

Перехід пристрою з розвернутого у вихідний стан виконується натисканням миші по кнопці – з наступним вибором команди **CLOSE**.

ЛАБОРАТОРНЕ ЗАВДАННЯ

1. Обрати з табл.1.1 необхідні параметри електричного кола.
2. Визначити постійну часу τ_0 , частоту зрізу f_z та комплексний коефіцієнт передавання кола $\dot{K}(\omega)$.
3. Побудувати у середовищі MathCAD графіки амплітудно-частотної і фазо-частотної характеристик коефіцієнта передавання кола у діапазоні $0... 10\omega_z$. Для АЧХ додатково побудувати графік в логарифмічному масштабі. Виміряти рівень коефіцієнта передавання (у разях і децибелах) на частотах $0.1\omega_z$, ω_z та $10\omega_z$ за допомогою функції Trace.
4. Зібрати схему у середовищі EWB та за допомогою Bode Plotter отримати графіки амплітудно-частотної і фазо-частотної характеристик коефіцієнта передавання кола у діапазоні $0... 10\omega_z$. Виміряти рівень коефіцієнта передавання (у разях і децибелах) на частотах $0.1\omega_z$, ω_z та $10\omega_z$ за допомогою маркеру.
5. Дати відповіді на контрольні запитання.
6. Оформити звіт.

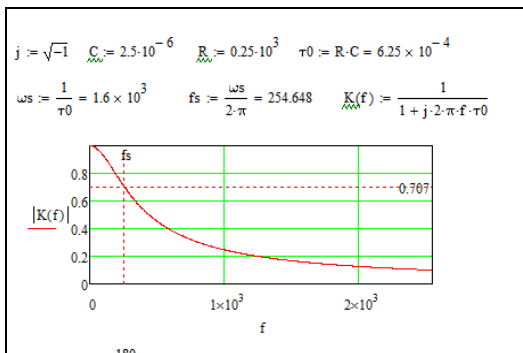
Таблиця 1.1 - Параметри електричного кола

№	Схема	R, кОм	C, мкФ L, мГн	№	Схема	R, кОм	C, мкФ L, мГн
1	Рис.1.1	0,10	3,0	16	Рис.1.1	0,85	3,0
2	Рис.1.2	0,15	3,3	17	Рис.1.2	0,90	2,5

3	Рис.1.3	0,20	3,6	18	Рис.1.3	0,95	2,0
4	Рис.1.4	0,25	3,9	19	Рис.1.4	1,00	1,5
5	Рис.1.1	0,30	4,2	20	Рис.1.1	1,05	1,0
6	Рис.1.2	0,35	4,5	21	Рис.1.2	1,10	1,5
7	Рис.1.3	0,40	4,8	22	Рис.1.3	1,15	2,0
8	Рис.1.4	0,45	5,1	23	Рис.1.4	1,20	2,5
9	Рис.1.1	0,50	5,4	24	Рис.1.1	1,25	3,0
10	Рис.1.2	0,55	5,7	25	Рис.1.2	1,30	3,5
11	Рис.1.3	0,60	6,0	26	Рис.1.3	1,35	4,0
12	Рис.1.4	0,65	6,3	27	Рис.1.4	1,40	4,5
13	Рис.1.1	0,70	6,6	28	Рис.1.1	1,45	5,0
14	Рис.1.2	0,75	6,9	29	Рис.1.2	1,50	5,5
15	Рис.1.3	0,80	7,2	30	Рис.1.3	1,55	6,0

ПРИКЛАД ДОСЛІДЖЕННЯ КОЛА

Для схеми, що наведена на рис.1.3, проведемо наступне моделювання у середовищі MathCAD.



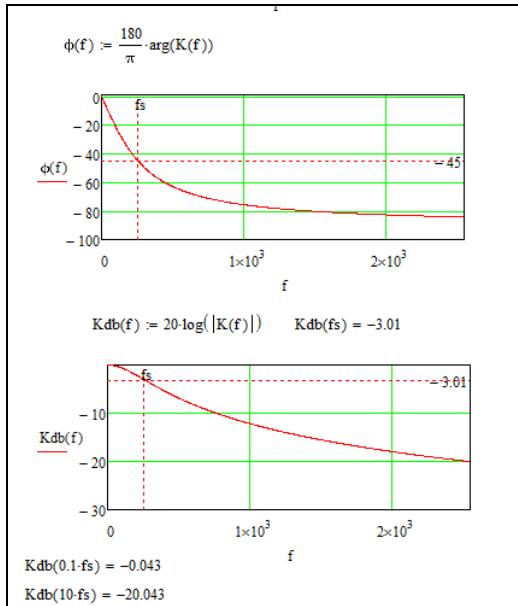


Рисунок 1.5

Для АЧХ рівень коефіцієнта передавання складає в разях і децибелах:

-на $0.1f_3 - 0,995$ (-0.043 Дб);

-на $f_3 - 0,707$ (-3.01 Дб);

-на $10f_3 - 0,1$ (-20.043 Дб).

Для ФЧХ рівень коефіцієнта передавання складає:

-на $0.1 f_3 - 5,7^0$;

-на $f_3 - 45^0$;

-на $10f_3 - 84,3^0$.

Далі проводимо аналогічне моделювання у середовищі EWB. Схема вимірювання наведена на рис. 1.6.

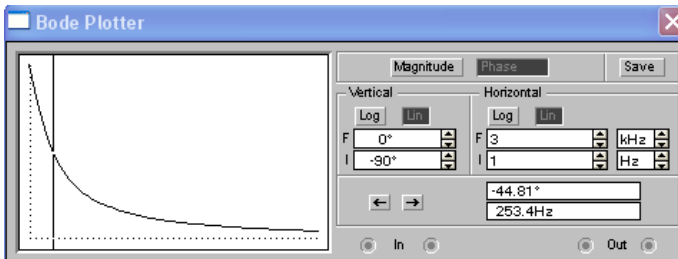
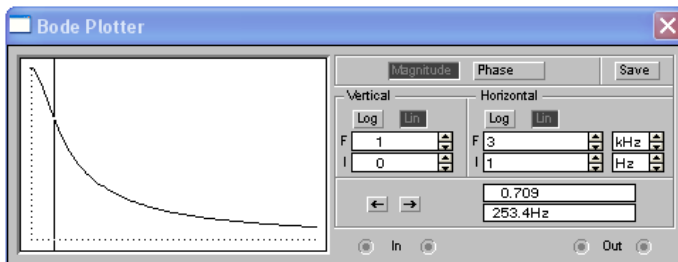
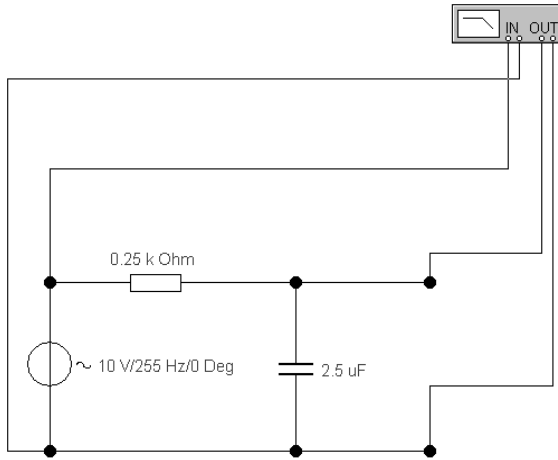


Рисунок 1.6

ЗМІСТ ЗВІТУ

1. Мета роботи.
2. Короткі теоретичні відомості.

3. Електрична схема, комплексний коефіцієнт передавання.
4. Графіки характеристик.
5. Рівні коефіцієнта передавання у разях і децибелах.
6. Лістинг програми.
7. Схема у середовищі EWB.
8. Рівні коефіцієнта передавання по плоттеру.
7. Висновки.
8. Відповіді на контрольні запитання.

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Навести гармонічне коливання $u(t) = U_m \cos(\omega t + \varphi)$ у комплексній формі.
2. Перейти від комплексної амплітуди $\dot{U}_m e^{j\varphi} = U_m e^{j(\varphi + \omega t)}$ до косинусоїдальної гармонічної функції, $j = \sqrt{-1}$.
3. Визначити модуль та аргумент комплексного числа $\dot{z} = a + jb$, $j = \sqrt{-1}$.
4. Визначити дійсну та уявну частину комплексного числа $\dot{Z} = |\dot{Z}| e^{j\varphi}$, $j = \sqrt{-1}$.
5. Як визначається комплексний коефіцієнт передавання кола за напругою?
6. Як за комплексним коефіцієнтом передавання визначити його модуль та аргумент? Як називаються графіки їх частотних залежностей?
7. Як визначається стала часу RC - та RL - кола?
8. Вивести формули для комплексного коефіцієнта передавання кола, що досліджується в роботі.
9. Як отримати коефіцієнт передавання за напругою у децибелах?
10. Чому дорівнює коефіцієнт передавання за напругою на частоті зрізу у разях та децибелах?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2 ДОСЛІДЖЕННЯ ЧАСТОТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОЛИВАЛЬНОГО КОНТУРУ

Мета роботи: розрахунок і дослідження амплітудно-частотної та фазо-частотної характеристик комплексного коефіцієнта передавання послідовного коливального контуру.

ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Послідовний коливальний контур наведено на рис. 2.1.

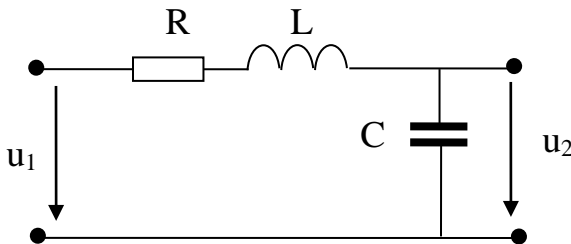


Рисунок 2.1 - Послідовний коливальний контур

Комплексний коефіцієнт передавання контуру визначається за виразом

$$\dot{K}(j\omega) = \frac{\dot{U}_{m2}}{\dot{U}_{m1}} = \frac{1}{j\omega C} \cdot \frac{1}{R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)} = \frac{1}{j\omega CR} \cdot \frac{1}{1 + ja(\omega)}, \quad (2.1)$$

де $a(\omega) = \frac{\omega L - 1/\omega C}{R}$ - узагальнене розстроювання контуру.

Амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) контуру визначається частотною залежністю модуля комплексного коефіцієнта передавання контуру

$$K = |\dot{K}(j\omega)| = \frac{1}{\omega CR} \cdot \frac{1}{\sqrt{1+a(\omega)^2}}. \quad (2.2)$$

Фазо-частотна характеристика (ФЧХ) визначається частотною залежністю аргументу комплексного коефіцієнта передавання

$$\varphi(\omega) = -\frac{\pi}{2} - \text{arctg}(a). \quad (2.3)$$

За умови резонансу: $a(\omega_0) = 0$; $\omega_0 L - 1/\omega_0 C = 0$.

Звідки витікає формула для резонансної частоти:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (2.4)$$

На резонансній частоті вирази (2.2) та (2.3) перетворюються наступним чином

$$K(\omega_0) = K_{\max} = Q; \quad (2.5)$$

$$\varphi(\omega_0) = -\frac{\pi}{2}, \quad (2.6)$$

де $Q = \frac{1}{\omega_0 CR} = \frac{\rho}{R}$ - добротність контуру;

$\rho = \frac{1}{\omega_0 C} = \omega_0 L = \sqrt{\frac{L}{C}}$ - характеристичний опір коливального

контуру.

Поблизу резонансу $\omega \approx \omega_0$, $1/\omega C \approx 1/\omega_0 C = \rho$, $a(\omega) = \frac{2\Delta\omega}{\omega_0} \cdot Q$,

$\Delta\omega = \omega - \omega_0$. З урахуванням цих наближень маємо:

$$K(\omega) \approx \frac{Q}{\sqrt{1 + \left(\frac{2\Delta\omega}{\omega_0} \cdot Q\right)^2}}. \quad (2.7)$$

Нормований коефіцієнт передавання

$$N(\omega) = \frac{K(\omega)}{K_{\max}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{2\Delta\omega}{\omega_0} \cdot Q\right)^2}}. \quad (2.8)$$

Межі ω_2, ω_1 смуги пропускання $\Delta\omega_{0.707} = \omega_2 - \omega_1$ частотно-вибіркового кола визначаються за формулою

$$N(\omega_1) = N(\omega_2) = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0,707. \quad (2.9)$$

На підставі (2.8) та (2.9) для контуру отримає:

$$2\Delta\omega_{0.707} = \frac{\omega_0}{Q}. \quad (2.10)$$

Таким чином, смуга пропускання контуру прямо пропорційна резонансній частоті та обернено пропорційна добротності.

ЛАБОРАТОРНЕ ЗАВДАННЯ

1. Обрати за номером в журналі параметри коливального контуру з табл. 2.1.

2. Побудувати за допомогою MathCAD-програми АЧХ та ФЧХ коефіцієнта передавання кола за точною формулою (2.1). Визначити смугу пропускання $2\Delta\omega_{0,707}$ за рівнем $0,707 \cdot K_{\max}$.

3. Побудувати за допомогою MathCAD-програми АЧХ та ФЧХ коефіцієнта передавання кола за наближеною формулою (2.8) для трьох значень добротності $Q_1 = \rho/R$, $Q_2 = \rho/2R$ та $Q_3 = \rho/0,5R$. Визначити смугу пропускання $2\Delta\omega_{0,707}$ за рівнем $0,707 \cdot K_{\max}$ і величину фаз на межах смуги пропускання.

4. Зібрати схему у середовищі EWB та за допомогою Bode Plotter отримати графіки АЧХ та ФЧХ коефіцієнта передавання кола для трьох значень добротності $Q_1 = \rho/R$, $Q_2 = \rho/2R$ та $Q_3 = \rho/0,5R$. Визначити смугу пропускання $2\Delta\omega_{0,707}$ за рівнем $0,707 \cdot K_{\max}$ і величину фаз на межах смуги пропускання.

5. Дати відповіді на контрольні запитання.

6. Оформити звіт.

Таблиця 2.1 – Значення елементів коливального контуру

№	R, Ом	L, мГн	C, пФ	№	R, Ом	L, мГн	C, пФ
1	250	3,0	10	16	175	7,5	47,5
2	245	3,3	12,5	17	170	7,8	50
3	240	3,6	15	18	165	8,1	52,5
4	235	3,9	17,5	19	160	8,4	55
5	230	4,2	20	20	155	8,7	57,5
6	225	4,5	22,5	21	150	9,0	60
7	220	4,8	25	22	145	9,3	62,5
8	215	5,1	27,5	23	140	9,6	65
9	210	5,4	30	24	135	9,9	67,5
10	205	5,7	32,5	25	130	10,2	70
11	200	6,0	35	26	125	10,5	72,5

12	195	6,3	37,5	27	120	10,8	75
13	190	6,6	40	28	115	11,1	77,5
14	185	6,9	42,5	29	110	11,4	80
15	180	7,2	45	30	105	11,7	82,5

ЗМІСТ ЗВІТУ

1. Мета роботи. Короткі теоретичні відомості.
2. Електрична схема, комплексний коефіцієнт передавання.
3. Графіки характеристик за точною і наближеною формулою.
4. Розрахунки смуги пропускання і величини фази.
5. Лістинг програми.
6. Схема у середовищі EWB.
7. Розрахунки смуги пропускання і величини фази по плоттеру.
8. Висновки.
9. Відповіді на контрольні запитання.

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Вивести формулу для комплексного коефіцієнта передавання послідовного коливального контуру.
2. Навести АЧХ послідовного коливального контуру. Пояснити, як визначається смуга пропускання контуру.
3. Вивести формулу для резонансної частоти.
4. Як визначається добротність контуру?
5. Чому дорівнює модуль та фаза комплексного коефіцієнта передавання послідовного контуру на резонансній частоті?
6. Що таке смуга пропускання і за якою формулою вона розраховується?
7. У скільки разів амплітуда напруги на конденсаторі або котушці індуктивності перевищує амплітуду вхідного сигналу на резонансній частоті?
8. Навести точну та приблизну формули для узагальненого розстроювання $a(\omega)$.
9. Як визначається характеристичний опір контуру?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3 ЧАСТОТНИЙ АНАЛІЗ РОЗГАЛУЖЕНОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО КОЛА

Мета роботи: аналіз розгалуженого електричного кола методом вузлових потенціалів та у середовищі Electronics Workbench.

ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Метод вузлових потенціалів – це метод розрахунку електричного кола довільної конфігурації, в якому за невідомі величини приймають потенціали вузлів схеми. Власні струми кожної гілки кола визначають за законом Ома. Цей метод застосовують для розрахунку складних електричних кіл, у яких кількість вузлів без одиниці менша за кількість незалежних контурів.

Алгоритм розрахунку електричного кола за методом вузлових потенціалів наступний.

1. Елементи кола перетворюють до вигляду, який є припустимим для методу вузлових потенціалів:
- комплексний опір замінюють комплексною провідністю

$$G_i = R_i^{-1}, \dot{Y}_{L_i} = (j\omega L_i)^{-1}, \dot{Y}_{C_i} = j\omega C_i; \quad (3.1)$$

- гілку, яка побудована з джерела напруги \dot{E} і послідовного комплексного опору \dot{Z}_i , замінюють джерелом струму $\dot{J} = \dot{Z}_i^{-1} \dot{E}$ з паралельною провідністю $\dot{Y}_i = \dot{Z}_i^{-1}$.

2. Складають граф схеми, задаються напрямком струму в гілках, нумерують вузли, починаючи з нуля. Вузлам привласнюють потенціали. Потенціал нульового вузла умовно приймають рівним нулю. Висловлюють напруги гілок через вузлові потенціали.

3. Складають у матричному вигляді систему вузлових рівнянь. Кількість незалежних вузлових рівнянь дорівнює числу вузлів без нульового.

4. Отриману систему рівнянь розв'язують довільним методом.
5. Через отримані вузлові потенціали знаходять напруги гілок.

6. За законом Ома визначають власні струми гілок.

У загальному випадку система вузлових рівнянь має вигляд:

$$Y \cdot \Phi = J. \quad (3.2)$$

або

$$Y = \begin{bmatrix} Y_{11} & -Y_{12} & -Y_{13} & \dots & -Y_{1n} \\ -Y_{21} & Y_{22} & -Y_{23} & \dots & Y_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ -Y_{n1} & -Y_{n2} & -Y_{n3} & \dots & Y_{nn} \end{bmatrix}, \quad \Phi = \begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \cdot \\ \varphi_n \end{bmatrix}, \quad J = \begin{bmatrix} J_{11} \\ J_{22} \\ \cdot \\ J_{nn} \end{bmatrix},$$

де φ_i - потенціал i -го вузла;

Y_{ii} - власна провідність вузла, що дорівнює сумі провідностей гілок, приєднаних до i -го вузла;

Y_{ij} - спільна провідність вузлів i, j , причому $Y_{ij} = Y_{ji}$;

J_{ii} - вузловий струм i -го вузла, який дорівнює сумі струмів усіх джерел струму у гілках, приєднаних до i -го вузла. Ці складові вузлового струму записують зі знаком "+", якщо вони спрямовані до вузла, та зі знаком "-", якщо вони спрямовані від вузла.

ЛАБОРАТОРНЕ ЗАВДАННЯ

1. Обрати за номером в журналі електричне коло та визначити параметри схеми. Варіанти електричних схем наведені у **Додатку А**.

2. Провести розрахунок електричного кола, тобто визначити власні струми та напруги у кожній гілці. Результати розрахунків висловити через модуль і фазу і занести в таблицю.

3. За законами Кірхгофа для нульового вузла і будь-якого контуру графа виконати перевірку результатів розрахунку.

4. Провести аналіз електричного кола у середовищі Electronics Workbench. За допомогою вольтметрів і амперметрів змінного струму виміряти струми і напруги на елементах схеми. Прилади вимірюють діюче значення змінного струму або напруги:

$I_D = I_m / \sqrt{2}$, $U_D = U_m / \sqrt{2}$, де I_m , U_m - амплітуди коливань.

Виміряні діючі величини струмів і напруг та їх фази занести в таблицю.

5. Дати відповіді на контрольні запитання.
6. Оформити звіт.

ЗМІСТ ЗВІТУ

1. Мета роботи.
2. Короткі теоретичні відомості.
3. Електрична схема, граф.
4. Таблиця зі значеннями струмів і напруг на резисторах.
5. Перевірка виконання законів Кірхгофа.
6. Лістинг програми.
7. Результати аналізу схеми у середовищі Electronics Workbench. Таблиця зі значеннями струмів і напруг.
8. Висновки.
9. Відповіді на контрольні запитання.

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Поясніть, які елементи є допустимими в методі вузлових потенціалів.
2. Поясніть які еквівалентні перетворення застосовують до джерела напруги.
3. Навести алгоритм розрахунку електричного кола за методом вузлових потенціалів.
4. Який вигляд має система рівнянь за методом вузлових потенціалів?
5. Скільки незалежних рівнянь матиме система, складена за методом вузлових потенціалів?
6. Як визначається напруга гілок?
7. Як знаходять струми гілок?
8. Як визначається діюча напруга і струм?
9. Як визначається змінний струм і напруга у середовищі Electronics Workbench?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №4 ДОСЛІДЖЕННЯ ЧАСОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК КІЛ ПЕРШОГО ПОРЯДКУ

Мета роботи: розрахунок і дослідження часових характеристик RC або RL - кіл.

ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Аналіз часових характеристик кіл заснований на вирішенні диференціальних рівнянь, що зв'язують струми і напруги на елементах кола. У загальному випадку рішення цих рівнянь здійснюється чисельно.

Найпростішими методами чисельного рішення диференціальних рівнянь є явний і неявний методи Ейлера.

При вирішенні рівняння

$$\frac{du}{dt} = f(t) \quad (4.1)$$

похідна на інтервалі t_{k-1} , t_k апроксимується кінцевими різницями: $du/dt \approx (u_k - u_{k-1})/\Delta t$, $\Delta t = t_k - t_{k-1}$.

Якщо права частина (4.1) береться в точці t_{k-1} , то має місце явний метод Ейлера:

$$u_k = u_{k-1} + \Delta t f(t_{k-1}). \quad (4.2)$$

Якщо права частина (4.1) береться в точці t_k , то має місце неявний метод Ейлера:

$$u_k = u_{k-1} + \Delta t f(t_k). \quad (4.3)$$

Отримані рівняння відносяться до класу різницевих. Процес перетворення диференціальних рівнянь в різницеві називається алгебраїзацією диференціальних рівнянь. В лабораторній роботі досліджуються кола, представлені на рис. 1.1 - 1.4. Ці схеми моделюються диференціальним рівнянням

$$\frac{du_C}{dt} = \frac{1}{\tau_0} (u_1 - u_C), \quad \tau_0 = RC \quad (4.4)$$

або

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L} u_1 - \frac{1}{\tau_0} i_L, \quad \tau_0 = L/R, \quad (4.5)$$

де u_C - напруга на конденсаторі,

i_L - струм котушки індуктивності,

u_1 - напруга на вході чотирьохполосника.

Перехід до інших струмів і напруг на елементах схеми виконується за формулами:

$$u_R = u_1 - u_C, \quad i_R = u_R/R; \quad (4.6)$$

$$u_R = R i_L, \quad u_L = u_1 - u_R. \quad (4.7)$$

Диференціальні рівняння повинні бути доповнені початковими умовами для часу $t = 0$. При нульових початкових умовах: $u_C(0) = 0$, $i_L(0) = 0$.

Застосувавши, наприклад до (4.4) формулу (4.2), отримаємо різницеве рівняння

$$u_C(k) = \left(1 - \frac{\Delta t}{\tau_0}\right) u_C(k-1) + \frac{\Delta t}{\tau_0} u_1(k-1). \quad (4.8)$$

Використання неявної формули (4.3) дає наступне різницеве рівняння:

$$u_C(k) = \frac{u_C(k-1) + \frac{\Delta t}{\tau_0} u_1(k)}{1 + \frac{\Delta t}{\tau_0}}. \quad (4.9)$$

Рішення різницевого рівнянь виконується рекурсивно, крок за кроком. Наприклад, рішення рівняння (4.8) за нульових початкових умов представляється у вигляді послідовності наступних кроків:

$$\left. \begin{aligned} u_C(1) &= \left(1 - \frac{\Delta t}{\tau_0}\right) 0 + \frac{\Delta t}{\tau_0} u_1(0), \\ u_C(2) &= \left(1 - \frac{\Delta t}{\tau_0}\right) u_C(1) + \frac{\Delta t}{\tau_0} u_1(1), \\ &\dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ u_C(k) &= \left(1 - \frac{\Delta t}{\tau_0}\right) u_C(k-1) + \frac{\Delta t}{\tau_0} u_1(k-1). \end{aligned} \right\} \quad (4.10)$$

Явний метод Ейлера має обмеження на величину кроку Δt . Для досліджуваних схем крок вибирається з умови $\Delta t < 2\tau_0$. Неявний метод Ейлера теоретично не має обмежень на величину кроку. Зі зменшенням величини кроку точність розрахунків збільшується.

Для аналізу в часовій області з використанням системи “Electronics Workbench” необхідно підключити до схеми функціональний генератор та осцилограф (осцилоскоп).

Генератор має наступні органи управління:

- кнопки вибору форми сигналу;
- регулятор частоти (Frequency);
- регулятор амплітуди (Amplitude);
- регулятор рівня постійної складової (Offset);
- регулятор коефіцієнта заповнення (Duty cycle).

Якщо сигнал знімається з виводів Com i + або - , то амплітуда дорівнює встановленому значенню, якщо між клемми + і - , то – подвоєному значенню.

Регулятор коефіцієнта заповнення діє тільки на прямокутний і трикутний сигнали та дозволяє в межах періоду проходження імпульсної послідовності змінювати тривалість імпульсу, наприклад, при установці 50% тривалість імпульсу буде дорівнювати половині періоду.

Осцилограф (двопроменевий) має канали А та В для одночасного спостереження двох сигналів.

Органи управління каналів А та В:

- V/div – установка масштабу по вертикальній вісі (вольт на поділку);
- Y pos – установка початкового зміщення променя;
- AC – закритий вхід (сигнал без постійної складової);
- DC – відкритий вхід (сигнал з постійною складовою);
- – вхід замкнуто.

Органи управління розверткою променів:

- Time base – установка швидкості розвертки (секунда на поділку);
- X pos – установка початкового зміщення променя;
- Y/T – внутрішня розвертка, на екрані промені А і В;
- В/А – на екрані промінь В, розвертка від каналу А;
- А/В – на екрані промінь А, розвертка від каналу В.

Органи управління синхронізацією:

- AUTO – автоматична синхронізація;
- А – синхронізація від каналу А;
- В – синхронізація від каналу В;
- EXT – зовнішня синхронізація;
- EDGE – запуск переднім та заднім фронтом імпульсу;
- LEVEL – установка рівня запуску розвертки.

Додаткова можливість – натиснення кнопки ZOOM забезпечує повноекранний режим перегляду осцилограм, їхню прокрутку від моменту початку рахунку до встановлення стаціонарного режиму, зняття чисельних значень за допомогою двох візирних ліній, а також запис результатів розрахунку (кнопка SAVE). Повернення у вихідний стан екрана здійснюється кнопкою REDUCE.

ЛАБОРАТОРНЕ ЗАВДАННЯ

Для схеми чотирирьохполюсника з лабораторної роботи №1 з параметрами, зазначеними в табл. 1.1, виконати аналіз у часовій області реакції схеми на вхідний вплив у вигляді прямокутного імпульсу висотою 1 В і тривалістю $\tau = 4 \tau_0$, де τ_0 - постійна часу кола. Інтервал аналізу від 0 до 2τ .

1. Скласти MathCAD-програму для вирішення диференціального рівняння заданої схеми явним методом Ейлера. Розрахувати і побудувати залежності від часу напруги і струму на елементах схеми.
2. Повторити п.1, використавши неявний метод Ейлера.
3. Зібрати схему у середовищі EWB і досліджувати проходження через схему прямокутного імпульсу з заданими параметрами.

ПРИКЛАД ДОСЛІДЖЕННЯ КОЛА

Фрагмент програми часового аналізу схеми моделюється диференціальним рівнянням (4.4) з використанням явного методу Ейлера (4.2).

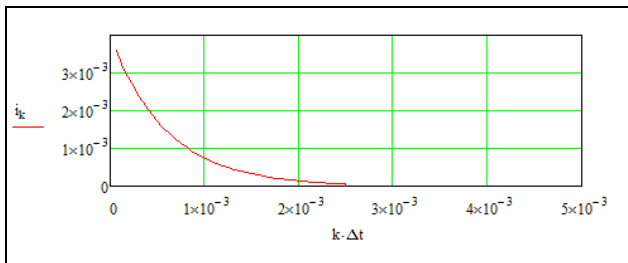
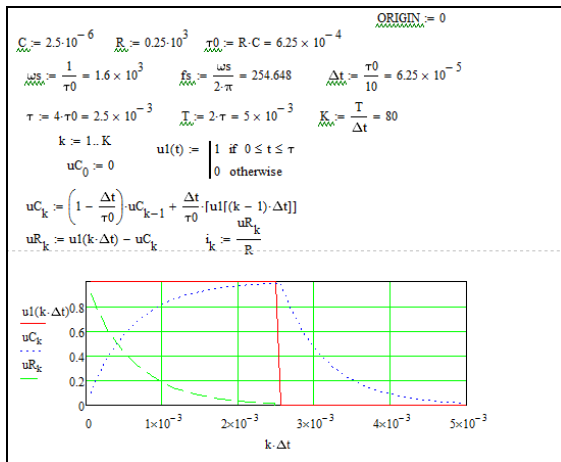
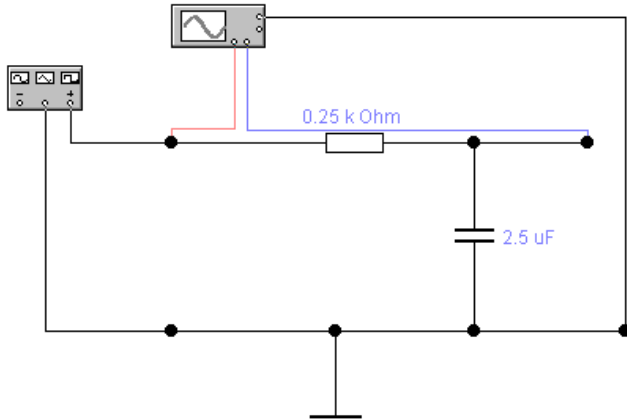
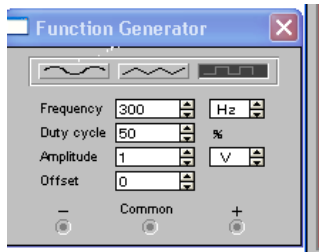


Рисунок 4.1

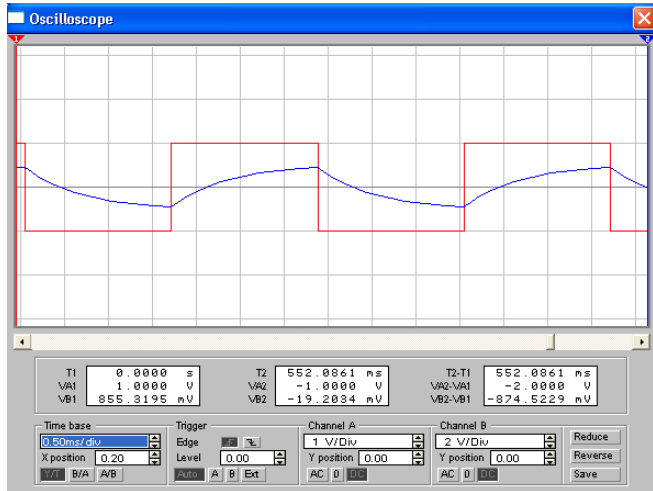
Для часового аналізу в середовищі EWB зібрати схему в відповідності з рис. 4.2.



a)



б)



в)
Рисунок 4.2

Підключіть функціональний генератор і вхід А осцилографа до входу схеми, вхід В – до виходу. Для зручності перегляду осцилограм помітьте їх різним кольором (два рази натисніть мишою по проводах каналів та оберіть бажаний колір).

На генераторі вклучіть сигнал прямокутної форми амплитудою 1 В. Частоту проходження імпульсів встановіть $F=1/(8t_0)$. Коефіцієнт заповнення – рівним 50%.

Налаштуйте осцилограф і отримайте осцилограму вихідного сигналу.

ЗМІСТ ЗВІТУ

1. Мета роботи.
2. Короткі теоретичні відомості.
3. Електрична схема, диференціальне і різницево рівняння.
4. Графіки характеристик для явного і неявного методів Ейлера.
5. Лістинг програми.

6. Результати аналізу схеми у середовищі Electronics Workbench..
7. Висновки.
8. Відповіді на контрольні запитання.

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Запишіть диференціальне рівняння для досліджуваної в лабораторній роботі схеми.
2. Запишіть формулу явного методу Ейлера.
3. Запишіть формулу неявного методу Ейлера.
4. Запишіть різницеве рівняння, складене для досліджуваної в лабораторній роботі схеми за явним методом Ейлера. Запишіть різницеве рівняння, складене для досліджуваної в лабораторній роботі схеми за неявним методом Ейлера.
5. Обмеження на крок рішення для явного і неявного методів Ейлера.
6. Як вирішуються різницеві рівняння? Наведіть приклад вирішення.
7. Призначення функціонального генератора.
8. Призначення осцилографа.

Перелік посилань

1. Основи теорії кіл, сигналів та процесів в електроніці: навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів / Л. М. Карпуков – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2021. – 163 с.
2. Основи теорії кіл, сигналів та процесів в системах технічного захисту інформації: підручник для студентів вищих навчальних закладів. Ч.1./ Ю.О. Коваль, І.О. Милютченко, А.М. Олейніков, В.М. Шокало та ін; за заг. редакцією В.М. Шокала. – Харків: НТМТ, 2011. – 544 с.
3. Соболев Ю.В. Теорія електричних і магнітних кіл./ Ю.В. Соболев, М.М. Бабаєв, М.Г. Давиденко – Харків: ХФВ «Транспорт України», 2002. – 264 с.

Додаток А

Варіанти електричних схем

Таблиця А.1 – Параметри електричного кола

Назва	Формула
Джерело напруги, В	$E_1 = n + jd$
	$E_2 = n$
	$E_3 = jd$
Резистори, кОм	$R_1 = 10d$
	$R_1 = 15d$
Конденсатори, мкФ	$C_1 = d$
	$C_2 = h$
Котушки індуктивності, Гн	$L_1 = d$
	$L_2 = h$
Частота, кГц	$f = n$
n - номер в журналі	
d - кількість букв в імені	
h - кількість букв у прізвищі	

Варіант схеми береться з таблиці А.2 за номером в журналі групи.

Таблица А.2 - Варіанти схем

