

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ
СІКОРСЬКОГО»

А.В. БУЛАШЕНКО, М.Ф. МХЕЯН

ОСНОВИ ТЕОРІЇ КІЛ. ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ

Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра
за освітніми програмами: «Інформаційна та комунікаційна радіоінженерія»,
«Інтелектуальні технології радіоелектронної техніки»,
«Радіотехнічні комп'ютеризовані системи»
спеціальності 172 Електронні комунікації та радіотехніка

Електронне мережне навчальне видання

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2023

Рецензент *Зінгер Я.Л.*, к.т.н., доцент кафедри ПРЕ РТФ
Мирончук О.Ю., PhD, ст. викл. кафедри РТС РТФ
Відповідальний редактор *Мартинюк С.Є.*, к.т.н., доцент, зав. кафедри РІ

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
(протокол № 4 від 19.01.2023 р.)
за поданням Вченої ради Радіотехнічного факультету (протокол № 15/2022
від 19.12.2022 р.)*

Електронне мережне навчальне видання

*Булашенко Андрій Васильович, ст. викладач кафедри радіоінженерії
Мхеян Міхаел Фрунзикович, інженер другої категорії кафедри радіоінженерії*

ОСНОВИ ТЕОРІЇ КІЛ. ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ

Основи теорії кіл. Лабораторний практикум. [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студентів спеціальності 172 Електронні комунікації та радіотехніка / А. В. Булашенко, М.Ф. Мхеян; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл 2.1 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 66с.

Навчальний посібник містить завдання для проведення лабораторних занять з дисципліни «Основи теорії кіл». Виконання робіт дає можливість отримати практичні навички вимірювання лінійних електричних кіл. Лабораторний практикум буде корисним студентам та викладачам, що виконують лабораторні роботи з дисципліни «Основи теорії кіл».

ЗМІСТ

Вступ.....	5
2. Загальні вимоги до підготовки, проведення і здачі лабораторних робіт	5
1. Лабораторна робота №1. ОСНОВНІ ВИМІРЮВАННЯ В ЕЛЕКТРИЧНИХ КОЛАХ.....	6
1.1. Зміст роботи.....	6
1.2. Домашнє завдання.....	7
1.3. Лабораторне завдання.....	8
1.4. Контрольні питання	9
2 Лабораторна робота №2. ОСНОВНІ ЗАКОНИ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ.....	10
2.1. Зміст роботи.....	10
2.3. Домашнє завдання.....	12
2.4. Лабораторне завдання.....	13
2.5. Комп'ютерне завдання.....	14
2.6. Контрольні питання	18
3. Лабораторна робота №3. ПРОСТІ КОЛА ГАРМОНІЧНОГО СТРУМУ	19
3.1. Зміст роботи.....	19
3.2. Домашнє завдання.....	20
3.3. Лабораторне завдання.....	22
3.5. Комп'ютерне завдання.....	23
3.6. Контрольні питання	26
4. Лабораторна робота №4. ПОСЛІДОВНИЙ КОЛИВАЛЬНИЙ КОНТУР	27
4.1. Опис макета.....	27
4.2. Домашнє завдання.....	28
4.3. Лабораторне завдання.....	28
4.4. Домашнє завдання.....	30
4.5. Комп'ютерне завдання.....	31
4.6. Контрольні питання	35
5. Лабораторна робота №5. ПАРАЛЕЛЬНИЙ КОЛИВАЛЬНИЙ КОНТУР	36
5.1. Опис макета.....	36
5.2. Домашнє завдання.....	37
5.3. Лабораторне завдання.....	37
5.4. Домашнє завдання.....	40
5.5. Комп'ютерне завдання.....	41
5.6. Контрольні питання	47
6. Лабораторна робота №6. ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ В ЛІНІЙНИХ КОЛАХ ...	48
6.1. Опис роботи	48
6.2. Домашнє завдання.....	50
6.3. Лабораторне завдання.....	51
6.4. Комп'ютерне завдання.....	52
6.5. Контрольні питання	56
7. Лабораторна робота № 7. КОЛА З РОЗПОДІЛЕНИМИ ПАРАМЕТРАМИ..	57
7.1. Опис роботи	57
7.2. Домашнє завдання.....	58

7.3.Лабораторне завдання.....	58
7.3. Контрольні питання	62
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	63
Додаток А. Зразок титульного аркуша до лабораторної роботи.....	65
Додаток Б. Таблиця перетворення Лапласа.....	66

Вступ

Лабораторний практикум є складовою частиною дисципліни «Основи теорії кіл». Виконання робіт дозволяє отримати навички експериментального зняття характеристик електричних кіл у лінійних, резонансних та перехідних режимів режимах із зосередженими та розподіленими параметрами. При роботі над посібником використовувалися джерела [1-17]. Посібник містить варіанти завдань для вимірювань в лабораторії у випадку очного навчання та варіанти завдань для вимірювань у програмі Multisim у випадку дистанційного або заочного навчання.

Засновниками напрямку теорії електричних кіл на радіотехнічному факультеті є такі викладачі кафедри теоретичних основ радіотехніки: професор Трохименко Я.К., професор Рибін О.І., доцент Любич Ф.Д., доцент Кісляковський А.В., доцент Медведєв Б.О., доцент Сташук В.Д. та інші викладачі кафедри. Серед викладачів кафедри також необхідно виділити наступних: Ястребова М.І., Гребенкова М.В., Смірнова В.П., Гусєву О.В., та Булашенко А.В., що внесли великий вклад в розвиток цього напрямку.

2. Загальні вимоги до підготовки, проведення і здачі лабораторних робіт

1. Під час підготовки до лабораторних робіт студенти мають детально ознайомитися з теоретичним матеріалом за тематикою лабораторної роботи.
2. Вивчити за цими посібником порядок проведення та виконання роботи.
3. Підготувати звіт до роботи, виконати відповідне домашнє завдання.
4. Для можливостей обробки експериментальних даних та оформлення результатів при виконанні лабораторної роботи необхідно мати: калькулятор із тригонометричними функціями, міліметровий папір, лінійку, олівець, ластик.
5. Безпосередньо перед роботою пройти вхідний контроль у письмовій формі. Позитивний результат вхідного контролю та наявність звіту та правильно виконаного домашнього завдання є підставою для допуску студента до виконання роботи.
6. При обробці результатів за результатами експериментальної та розрахункової частин побудувати на міліметровому папері із додержанням масштабу олівцем і під лінійку необхідні графіки і діаграми
7. Одержані і належним чином оброблені й оформленні результати роботи показати викладачеві. Якщо результати задовільні, викладач підтверджує це своїм підписом у Журналі. У протилежному разівін зазначає, які частини експерименту необхідно повторити.
8. Оформити звіт про виконання роботи. Оформлення звіту про виконану роботу виконується кожним студентом окремо. Захист лабораторної роботи здійснюється на підставі відпрацьованої роботи та правильно оформленою у формі співбесіди, на якій студент повинен ясно і змістовно пояснити суть роботи, отримані результати пояснити з теоретичними положеннями. За наявності часу, оформлення і захисту звіту про лабораторну роботу допускається в день її виконання. Наявність усіх зданих та захищених Звітів є необхідною умовою допуску до іспиту. Зразок титульного аркушу до звіту наведений у доданку А.

1. Лабораторна робота №1. ОСНОВНІ ВИМІРЮВАННЯ В ЕЛЕКТРИЧНИХ КОЛАХ

Мета роботи: вивчення методики вимірювань в електричних колах та ознайомлення з основними вимірюючими приладами.

Прилади та макети: Вольтметр і міліамперметр магнітоелектричної системи типу М45; осцилограф типу С1-83; генератор звукових частот типу ГЗ-33; резистор R_X , який підлягає вимірюванню, з опором $R = 0,5 \dots 5$ кОм; ланцюг RC ($R = 100$ кОм, $C = 1000$ пФ); резистор R з опором $50 \dots 60$ Ом ($P = 2$ Вт); макет “Набірне поле”.

1.1. Зміст роботи

В електричних колах постійного струму основні вимірювання можна звести до вимірювання напруг і струмів, що мають на окремих ділянках кола. З цією метою використовуються стрілочні прилади магнітоелектричної системи. Границі вимірювань амперметра можуть бути розширені за допомогою додаткових опорів, які підключають паралельно вимірювальному приладу і називають шунтами. Для розширення границь вольтметра додаткові опори включають послідовно.

При проведенні вимірювань необхідно враховувати вплив вимірювального приладу на режим електричного кола. Ступінь впливу амперметра або вольтметра на коло постійного струму залежить від їх внутрішнього опору, яке необхідно знати для оцінки достовірності результатів вимірювань. Оцінити значення внутрішніх опорів вольтметра R_B та амперметра R_A можна за допомогою схем, які зображено на рис.1.1 (опір $R_{\text{ЗАГ}} \approx 1$ кОм служить для обмеження струму через амперметр).

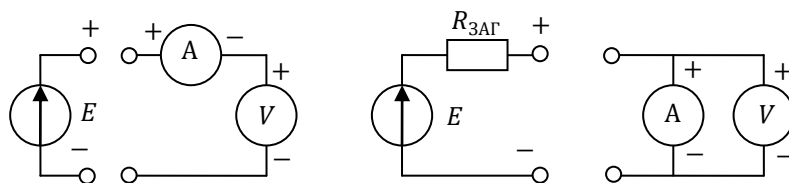


Рисунок 1.1 – Схеми для дослідження

Вольтметром і амперметром можна скористатися для вимірювання невідомого опору R_X , якщо зібрати одну з схем, які зображені на рис. 3.2. Значення R_X за показаннями приладів в схемі на рис.1.2,а може бути визначено за допомогою формули $R_X = \frac{U}{I - I_B}$, де враховано, що струм через невідомий опір R_X менше струму, який тече через амперметр, на величину I_B (струм через вольтметр). Якщо опір вольтметра відомий, то $I_B = U/R_B$.

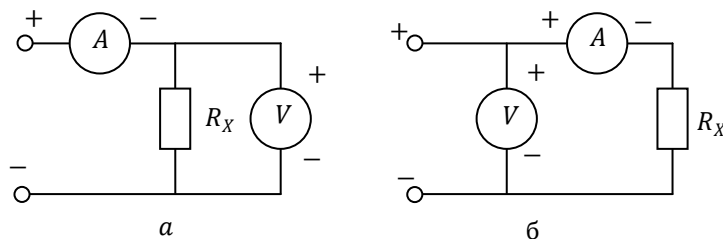


Рисунок 1.2 – Схеми для підключення вольтметра та амперметра

Формулу для визначення R_X в схемі на рис.1.2,б необхідно вивести самостійно.

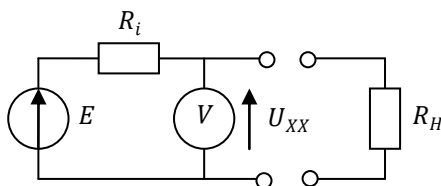


Рисунок 1.3 – Схема для визначення напруги холостого ходу

Внутрішній опір R_i джерела, яке дає в навантаження R_H постійний струм, можна розрахувати за навантажувальною вольт-амперною характеристикою (її можна вважати лінійною і побудувати за двома точками $E = U_{XX}$ та напрузі на відомому опорі $R_H = R_{\text{ЕТАЛ}}$ (схема на рис.1.3).

При дослідженні різних радіотехнічних приладів часто виникає необхідність в джерелах змінних (за часом) напруг різної форми. Одним з таких приладів є генератор ГЗ-34 (генератор звукових частот), який дозволяє отримувати калібровані за амплітудою і частотою гармонічні коливання в діапазоні частот 20...20000 Гц. Для спостереження форми коливань широко використовують електронні осцилографи, які дозволяють спостерігати не тільки форму коливань, а і проводити вимірювання всіх параметрів цих коливань.

1.2. Домашнє завдання

1. Ознайомитись з короткими описами та експлуатаційними інструкціями генератора і осцилографа. Уявити призначення окремих ручок керування та шкал. У звіті лабораторної роботи привести структурні схеми та короткі технічні характеристики цих приладів.
2. Вивести формулу для визначення значення невідомого опору R_X при вимірюванні його за допомогою вольтметра та амперметра за схемою на рис.1.2,б.
3. Продумати методику вимірювання внутрішнього опору джерела і підготувати необхідні розрахункові співвідношення.

1.3. Лабораторне завдання

1. Визначити внутрішній опір вольтметра М-45 на шкалі 15 В та міліамперметру М-45 на шкалі 7.5 мА за схемами на рис. 1.1, а,б.

$$I_A = \text{_____ мА}, U_B = \text{_____ В}, R_A = \text{_____ Ом (рис.1.1,а)};$$

$$I_A = \text{_____ мА}, U_B = \text{_____ В}, R_B = \text{_____ Ом (рис.1.1,б)}.$$

2. За допомогою вольтметра і амперметра виміряти значення невідомого опору за схемами на рис.1.2. Розрахувати R_X в обох випадках та порівняти отримані результати.

$$I_A = \text{_____ мА}, U_B = \text{_____ В}, I_B = \text{_____ мА}, R_X = \text{_____ Ом (рис.3.2,а)};$$

$$I_A = \text{_____ мА}, U_B = \text{_____ В}, U_A = \text{_____ мА}, R_X = \text{_____ Ом (рис.3.2,б)}.$$

3. За схемою на рис.3.3 виміряти внутрішній опір джерела 12 В, визначивши напругу на ньому при холостому ході і навантаженні $R_H = 100 \text{ Ом}$ (3 Вт).

$$U_{XX} = \text{_____ В}, U_H = \text{_____ В}, R_i = \text{_____ Ом}.$$

4. Подати на вхід “Y” осцилографу напругу з виходу генератора ГЗ-34 частотою 1 кГц. Регулюючи рівень синхронізації і частоту генератора розгортки при внутрішній синхронізації, добитися стійкого зображення на екрані двох періодів сигналу. Не зміюючи швидкості розгортки осцилографу збільшити частоту коливаний до 2 кГц. Зарисувати отримані осцилограми.

Вказівка. При використанні приладів строго додержуватися полярності підключення: сигнальний провід генератора з’єднати з сигнальним проводом осцилографу, земельний (загальний) – з земельним.

5. Визначити амплітуду сигналу, необхідну для отримання на екрані осцилографу розмаху зображення в 1 см при максимальному підсиленні каналу “Y”.

6. Зібрати схему на рис.1.4, встановити осцилограф в режим зовнішньої синхронізації, а частоту сигналу генератора – 1 кГц. Добитися стійкого зображення на екрані. Замалювати та порівняти осцилограми напруг в точках 1 і 2 схеми при підключенні їх до входу “Y” та врахуванні їх положення по відношенню до початку розгортки. За осцилограмою визначити фазовий зсув між цими напругами.

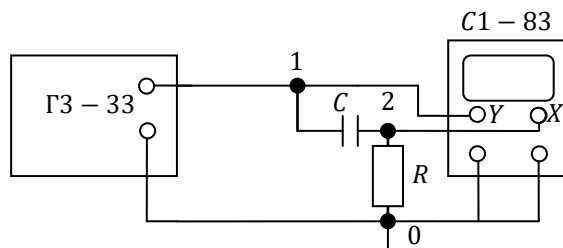


Рисунок 1.4 – Схема підключення осцилографу

7. Перевести осцилограф в режим підсилення каналу "X" (режим зовнішньої розгортки). Підключити його входи до точок 1 і 2 схеми (рис.1.4) та відрегулювати підсилення так, щоби на екрані спостерігався еліпс. Пояснити отриманий результат.

1.4. Контрольні питання

1. Як оцінити придатність вольтметра з внутрішнім опором R_B або амперметра з внутрішнім опором R_A для вимірювання напруг та струмів в колі?
2. Чому покази приладів в схемі рис.1.2,а та 1.2,б при вимірювання одного і того ж опору можуть бути різними?
3. Для чого необхідна синхронізація розгортки сигналом при роботі осцилографу?
4. В чому різниця між зовнішньою та внутрішньою синхронізаціями?
5. Яким чином можна пересвідчитися у наявності фазового зсуву між двома напругами за допомогою осцилографу?
6. В якому разі світна точка (яка світиться) може прокреслити на екрані осцилографу коло?
7. Які властивості мають джерела струму і джерела напруги?

2 Лабораторна робота №2. ОСНОВНІ ЗАКОНИ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ

Мета роботи: експериментальна перевірка законів Кірхгофа, принципу накладання (суперпозиції), теореми про еквівалентний генератор та балансу потужностей.

Прилади та макети: Універсальний лабораторний стенд; міліамперметр постійного струму; макет "набірне поле"; плата досліджуваного кола.

2.1. Зміст роботи

У роботі використовується коло (рис. 2.1) із двома джерелами постійного струму $E_1 = E_2 = 12$ (окремі джерела з малим внутрішнім опором) і два прилади для вимірювання – міліамперметр та вольтметр постійного струму.

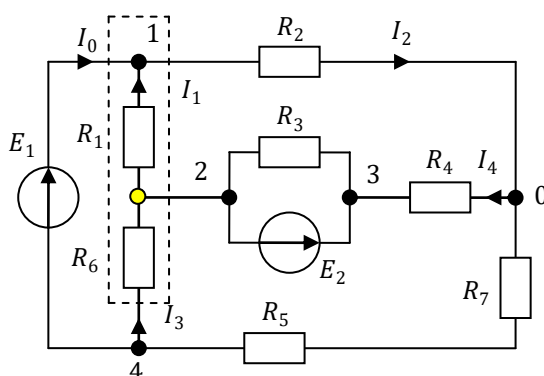


Рисунок 2.1 – Коло, що досліджується

Експериментальна перевірка першого закону Кірхгофа виконується шляхом вимірювання струмів, що входять у будь-який довільний переріз, який охоплює частину кола, та перевірки виконання рівності $\sum I_k = 0$.

За першим законом Кірхгофа для вула 1

$$I_0 = I_2 - I_1.$$

За першим законом Кірхгофа для вула 2

$$I_1 = I_3 + I_4.$$

Підставимо друге рівняння у перше

$$I_0 = I_2 - I_1 = I_2 - I_3 - I_4.$$

Тоді для перерізу (область виділена штриховими лініями, рис. 2.1) повинна виконуватися рівність

$$I_0 - I_2 + I_3 + I_4 = 0,$$

за умови, що всі струми, які входять до перерізу, беруться зі знаком "+", а ті, які виходять, – зі знаком "-".

Для експериментальної перевірки другого закону Кірхгофа треба виміряти падіння напруг на всіх елементах будь-якого контуру та перевірити рівність $\sum U_k = 0$. Так для контуру, який проходить через вузли 0, 4, 2, 1, 0, повинна виконуватися рівність (рис. 2.2)

$$U_{R6} + U_{R2} + U_{R5} + U_{R7} - U_{R1} = 0,$$

де знак "+" береться, якщо падіння напруги на елементі співпадає з додатнім

напрямок обходу контуру (за напрямком годинникової стрілки).

Якщо прийняти $U_{ij} = U_i - U_j$, де U_i – більш високий потенціал, ніж U_j , тоді для того ж контуру можна записати:

$$U_{40} + U_{24} + U_{12} + U_{01} = 0$$

або

$$-U_{04} + U_{24} - U_{21} - U_{10} = 0 \text{ та ін.}$$

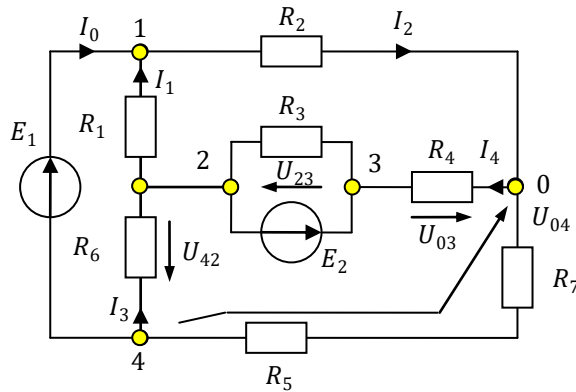


Рисунок 2.2 – Схема для перевірки другого закону Кірхгофа

Перевірку справедливості принципу суперпозиції (накладення) можна провести, вимірюючи струм в одній із гілок кола, наприклад, струм I_2 (рис. 2.3) при роздільній та одночасній дії джерел E_1 і E_2 . Так, якщо позначити струм у цій гілці, який зумовлений дією тільки джерела E_2 , через I_2' , а дією тільки джерела E_1 – через I_2'' , тоді при одночасній дії обох джерел (при умові, що умовні напрями I_2' і I_2'' співпадають з I_2) повинно бути $I_2 = I_2' + I_2''$.

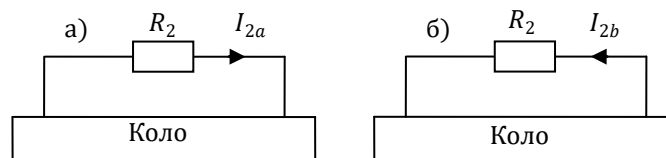


Рисунок 2.3 – Схема для перевірки принципу суперпозиції

Експериментальну перевірку теореми про еквівалентний генератор напруги можна провести, розрахувавши струм I_2 за вимірними $U_{10.XX}$ та $I_{2.КЗ}$ (рис. 2.2). Для цього необхідно замкнути вузли 1 та 0 та виміряти струм $I_{2.КЗ}$; розімкнути гілку з опором R_2 і виміряти напругу між вузлами 1 та 0 $-U_{10.XX}$. Тоді $E_{ЕГ} = U_{10.XX}$; $R_{ЕГ} = U_{10.XX}/I_{2.КЗ}$, а струм I_2 визначається (рис.2.4).

$$I_2 = \frac{E_{ЕГ}}{R_{ЕГ} + R_2}$$

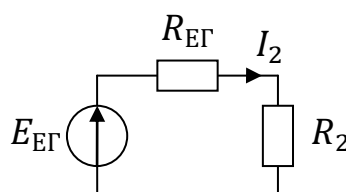


Рисунок 2.4 – Схема для перевірки методу еквівалентного генератора

Значення $R_{\text{ЕГ}}$ можна знайти: виключити зі схеми всі джерела напруги і на їх місця поставити замикачі, які імітують внутрішні опори джерел. Далі необхідно розрахувати опір двополюсника відносно вузлів 1 та 0 при вилученому R_2 .

2.3. Домашнє завдання

1. Відповідно до свого варіанту (номера бригади) розрахувати будь-яким методом усі струми та напруги у колі (рис. 2.1). Числові значення струмів (в мА) та напруг(в В) нанести на схему з урахуванням напрямку.
2. Перевірити справедливість принципу накладання (суперпозиції) для струму I_2 : розрахувати I_{2a} та I_{2b} і переконатися, що $I_2 = I_{2a} + I_{2b}$.
3. Перевірити баланс потужностей для початкової схеми (рис. 2.1).
4. Використовуючи теорему про еквівалентний генератор, розрахувати струм в опорі R_2 та напругу на R_2 (теоретичні значення $U_{\text{ХХ}}$ та $I_{\text{КЗ}}$ повинні теж бути записані!).

Таблиця 2.1 – Варіанти завдання

Варіанти (номера бригад)	$R_{1\text{К}}$ Ом	$R_{2\text{К}}$ Ом	$R_{3\text{К}}$ Ом	$R_{4\text{К}}$ Ом	$R_{5\text{К}}$ Ом	$R_{6\text{К}}$ Ом	$R_{7\text{К}}$ Ом
1 та 6	0.56	1.0	0.56	0.68	0.36	0.56	0.36
2 та 7	1.0	1.5	1.0	0.68	0.68	0.36	0.68
3 та 8	0.68	1.5	0.68	0.56	0.56	0.68	0.36
4 та 9	0.56	1.5	0.68	0.56	0.68	0.36	0.68
5 та 10	0.56	1.0	0.68	1.0	0.68	1.5	0.56

2.4. Лабораторне завдання

1. Зібрати коло, що досліджується (рис. 2.5). Для контуру з вузлами 0,4,2,3,0 виміряти напруги між вузлами, занести їх у таблицю 2.2 та перевірити виконання другого закону Кірхгофа.

Таблиця 2.2 – Виміряні напруги

U_{04} [В]	U_{42} [В]	U_{23} [В]	U_{30} [В]

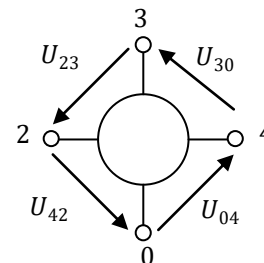


Рисунок 2.5 - Схема

$$U_{04} + U_{42} + U_{23} + U_{30} = 0.$$

2. Виміряти струми у гілках та перевірити виконання першого закону Кірхгофа для перерізу 1-4 (рис. 2.1), данні занести до таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Виміряні струми

I_0 [мА]	I_2 [мА]	I_3 [мА]	I_4 [мА]

Перевіримо виконання першого закону Кірхгофа

$$I_0 + I_3 + I_4 - I_2 =$$

3. По черзі усуваючи джерела E_1 та E_2 перевірити виконання принципу суперпозиції, вимірюючи струми I_{2a} , I_{2b} , I_2 (значення в мА):

$$I_{2a} = \quad ; I_{2b} = \quad ; I_2 = I_{2a} + I_{2b} =$$

4. Визначити параметри еквівалентного генератора - $E_{ЕКВ}$ та $R_{ЕГ}$ відносно вузлів 1 та 0 при усуненому R_2 . Для цього виміряти $I_{2.КЗ}$ та $U_{10.ХХ}$. Тоді $E_{ЕГ} = U_{10.ХХ}$, $R_{ЕГ} = U_{10.ХХ}/I_{2.КЗ}$. На підставі вимірів і теореми про еквівалентний генератор розрахувати струм I_2 та порівняти його з раніш отриманими значеннями:

$$U_{10.ХХ} = \quad [В]; I_{2.КЗ} = \quad [мА]; R_{ЕГ} = \quad [кОм],$$

$$I_2 = \frac{E_{ЕГ}}{R_{ЕГ} + R_2} =$$

Висновки: всі отримані дані порівняти з тим, що були розраховані при виконанні домашнього завдання. Зробити висновки з приводу можливих розходжень між ними.

2.5. Комп'ютерне завдання

1. У програмі Multisim зібрати схему згідно варіанту завдання та підключити до неї два джерела постійної напруги та амперметри для вимірювання струмів у гілках за зразком, що подані на рис 2.6.

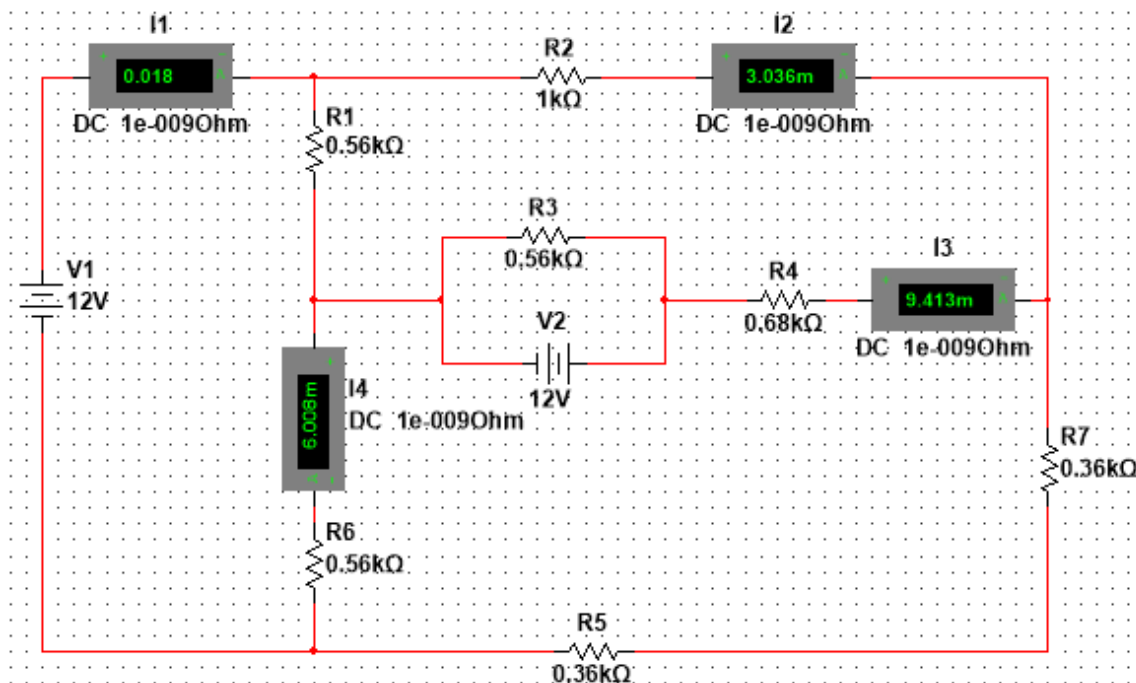


Рисунок 2.6 – Зразок схеми для дослідження першого закону Кірхгофа в програмі Multisim

Вимірювальний амперметр можна обрати в меню індикатори у відповідному меню (рис. 2.7).

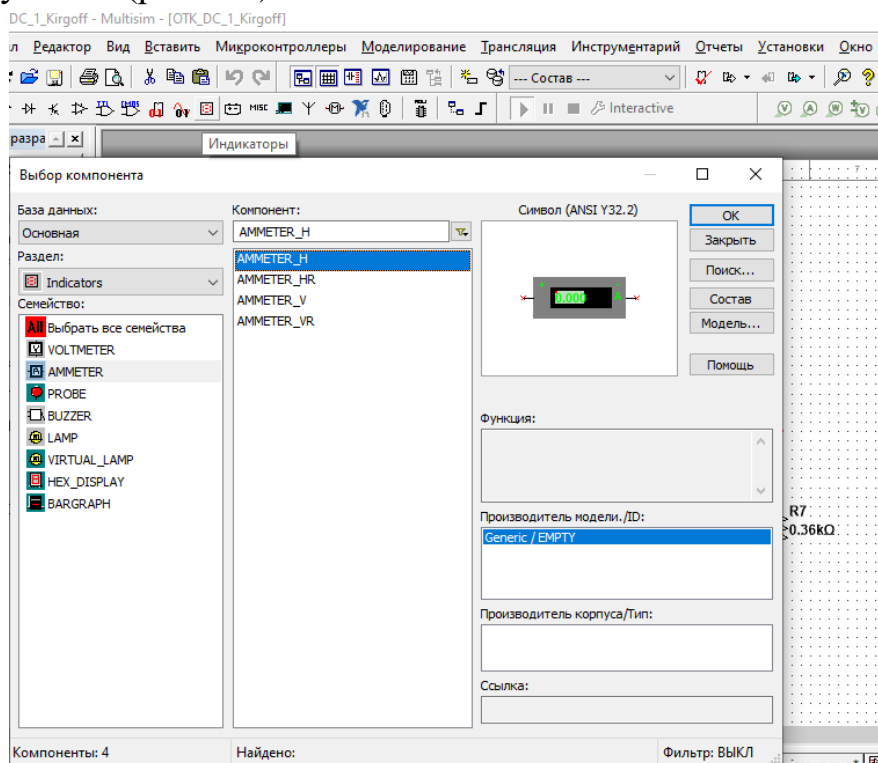


Рисунок 2.7 – Вікно вибору вимірювального амперметра

Джерело напруги обирається у меню джерела POWER_SOURCES – DC-Power (рис. 2.8).

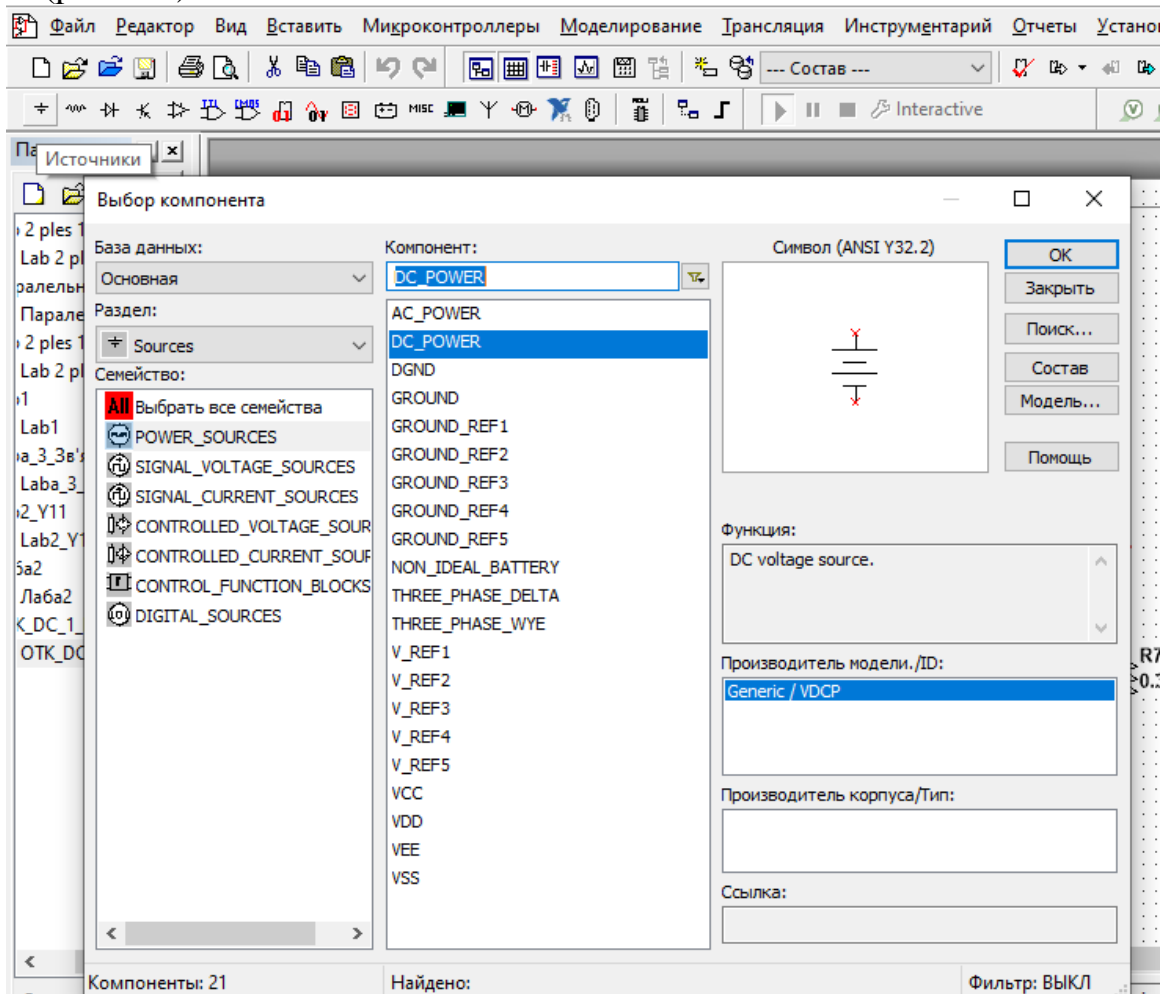


Рисунок 2.8 – Вікно вибору джерела напруги

Виміряні струми занести до таблиці 2.3.

2. У програмі Multisim зібрати схему згідно варіанту завдання та підключити до неї два джерела постійної напруги та вольтметри для вимірювання напруг у колі за зразком, що подані на рис 2.9.

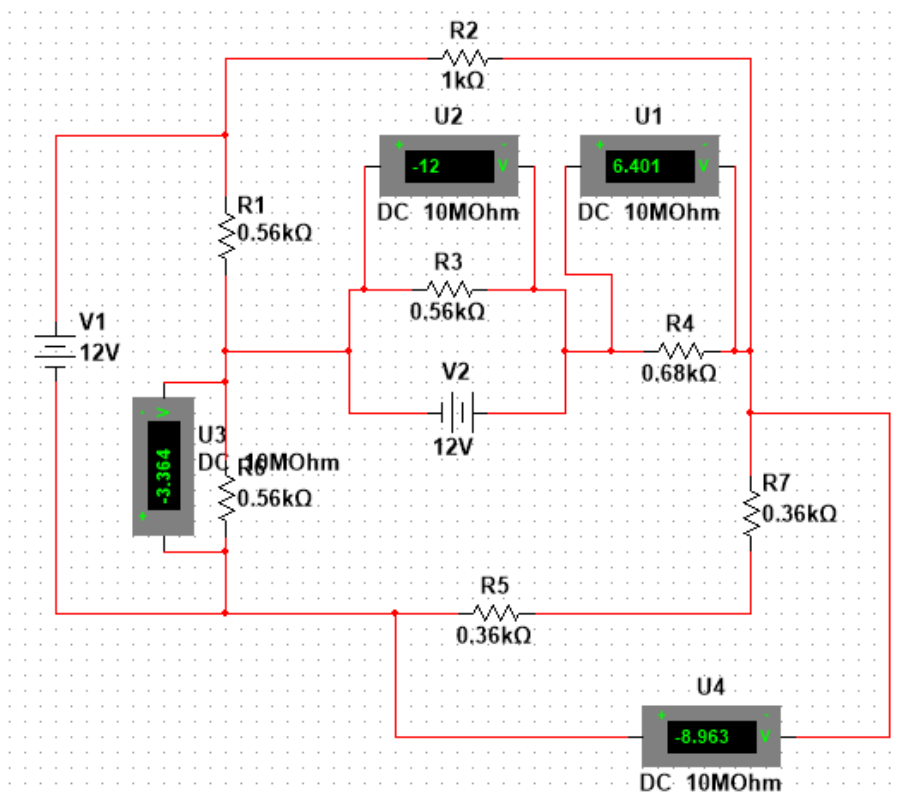


Рисунок 2.9 – Зразок схеми для дослідження другого закону Кірхгофа в програмі Multisim

Вимірювальний амперметр можна обрати в меню індикатори у відповідному меню (рис. 2.10).

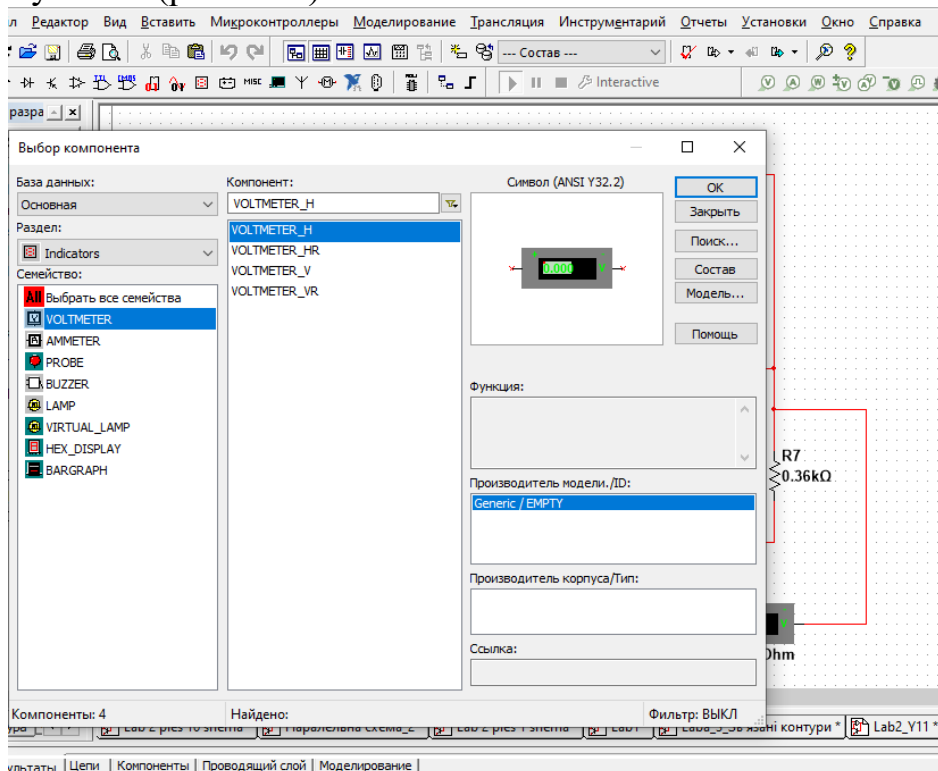


Рисунок 2.10 – Вікно вибору вимірювального амперметра

Виміряні струми занести до таблиці 2.2.

3. У програмі Multisim у схемі, що була зібрана у пункті 1 (рис. 2.6) кожне із джерел напруги замінити його внутрішнім опором (закороткою) та здійснити вимір струму через опір R_2 за принципом суперпозиції (рис. 2.11).

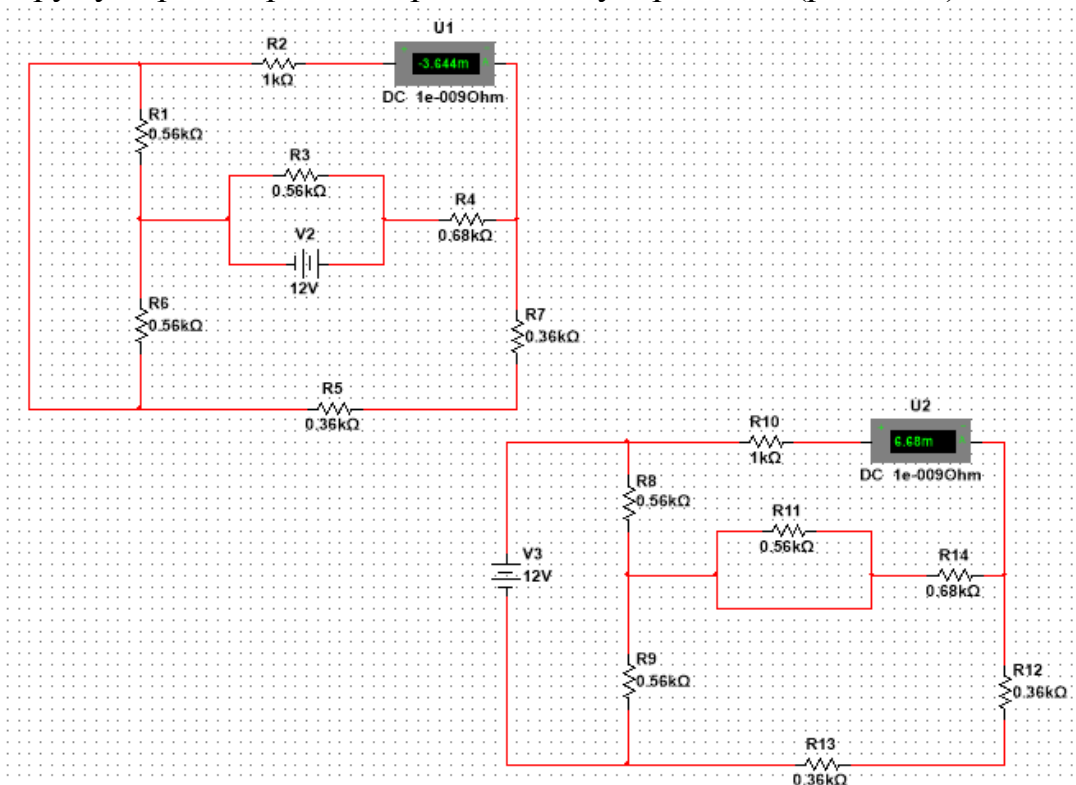


Рисунок 2.11 – Схеми для вимірювання струму за принципом суперпозиції

Із урахуванням напрямку за принципом суперпозиції обчислити струм через опір R_2 , а результати занести то таблиці 2.4

Таблиця 2.4 - Результати вимірювань за принципом суперпозиції

I_{2a} [mA]	I_{2b} [mA]	$I_2 = I_{2a} + I_{2b}$ [mA]

4. У програмі Multisim у схемі, що була зібрана у пункті 1 (рис. 2.6) здійснити вимірювання струму через опір R_2 за методом еквівалентного генератора (рис. 2.12). Для цього треба виміряти струм короткого замикання за допомогою амперметра у гілці, де був включений опір R_2 . Також для цього треба виміряти напругу холостого ходу за допомогою вольтметра у гілці, де був включений опір R_2 .

Результати вимірювань занести до таблиці 2.5 та здійснити відповідні обчислення.

Таблиця 2.5 - Результати вимірювань за принципом суперпозиції

$I_{2КЗ}$ [mA]	$U_{2ХХ}$ [V]	$R_{ЕГ} = U_{2ХХ}/I_{2КЗ}$	$I_2 = U_{2ХХ}/(R_{ЕГ} + R_2)$ [mA]

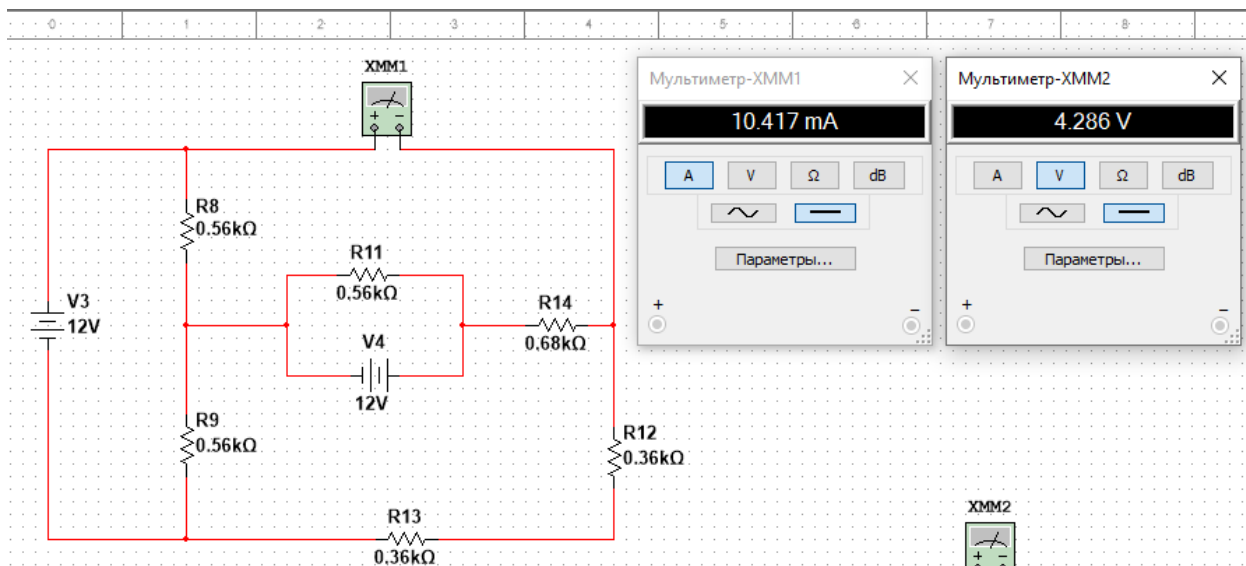


Рисунок 2.10 – Схеми для вимірювання методом еквівалентного генератора

Для більш детального ознайомлення з методикою вимірювань у Multisim необхідно скористатися джерелами [2, 7].

2.6. Контрольні питання

1. Що таке струм та напруга?
2. Сформулювати закон Ома.
3. Сформулювати закони Кірхгофа та пояснити з їх фізичної точки зору.
4. Як до кола підключається амперметр? Чому дорівнює внутрішній опір реального та ідеального амперметру?
5. Як до кола підключається вольтметр? Чому дорівнює внутрішній опір реального та ідеального вольтметра?
6. Що таке джерело струму? Чому дорівнює його внутрішній опір?
7. Що таке джерело напруги? Чому дорівнює його внутрішній опір?
8. Що таке потужність? Що таке споживана потужність?
9. Що таке опір та провідність? Який їх фізичний зміст?
10. В чому суть закону балансу потужності?
11. В чому полягає метод суперпозиції?
12. Як можна застосувати теорему про еквівалентний генератор для розрахунку лінійних електричних кіл?
13. Чому під час експериментальної перевірки рівності $\sum I_k = 0$ та $\sum U_k = 0$ виконуються приблизно?
14. Сутність теореми про еквівалентний генератор.
15. По яким правилам складається система рівнянь на основі методу контурних струмів (вузлових напруг)?

Література для підготовки: [4] с. 20-23, 28-31, 51-54, 61-63, 67-69, 70-73.

3.Лабораторна робота №3. ПРОСТІ КОЛА ГАРМОНІЧНОГО СТРУМУ

Мета роботи: експериментальне дослідження процесів в колах гармонічного струму; визначення активного, реактивного та повного опору і провідностей; фазових кутів; перевірка балансу потужностей.

Прилади та макети: генератор ГЗ-33; вольтметр типу ВЗ-2А; осцилограф типу С1-83; макет "Набірне поле" з R, L, C - елементами.

3.1.Зміст роботи

Дослідженню підлягають кола, схеми яких показані на рис. 3.1.

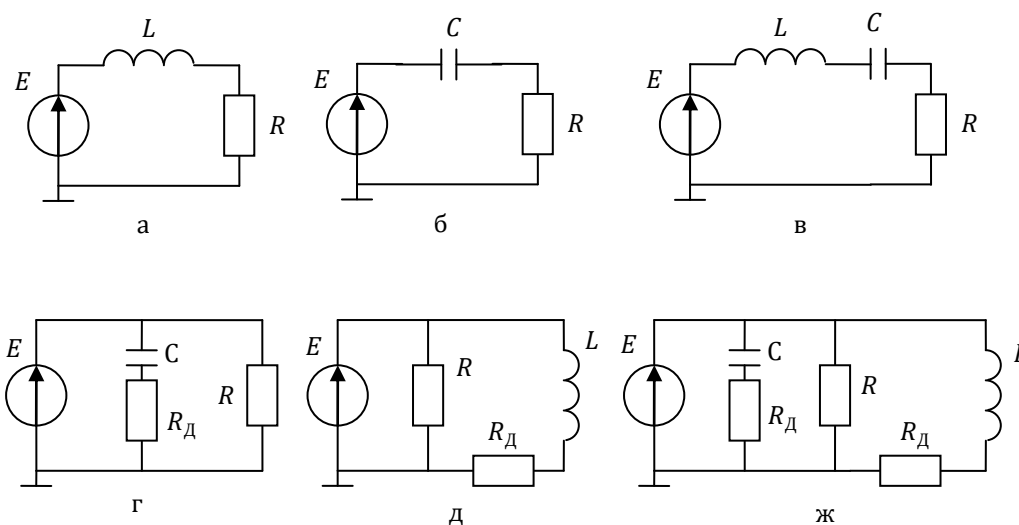


Рисунок 3.1 – Схеми, що досліджуються

Живлення кожного кола здійснюється від генератора ГЗ-33 при вихідному опорі $50\ \Omega$. Напряга на елементах вимірюється за допомогою вольтметра змінного струму, один з полюсів якого з'єднані з корпусом ("землею"). При вимірюваннях корпус вольтметра завжди повинен бути з'єднані з корпусом генератора та осцилографа. Оскільки при послідовному з'єднанні елементів порядок їх включення не має значення, вимір напруги на них можна виконати шляхом їх перестановки (рис. 3.2)

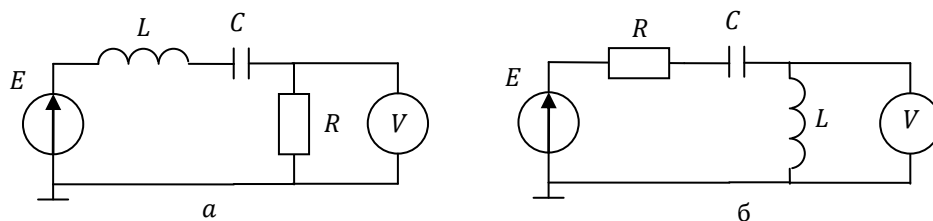


Рисунок 3.2 – Схеми вимірювання напруги на елементах

Для вимірювання струмів в елементах використовують метод вольтметра: струм обчислюється по падінню напруги на відомому опорі – $I = U/R$. В тому разі, коли елемент не містить послідовно увімкненого резистора, до нього послідовно вмикають додатковий резистор $R_{д}$ (рис.3.2. г-ж), значення якого на

частоті вимірювань набагато менше опору будь якого іншого елемента гілки. В роботі використовується резистор з опором 39 Ом.

Вимірювання фазових зсувів між двома гармонічними напругами можна провадити за допомогою осцилографа (рис. 3.3). В цьому разі гармонічні напруги, між якими визначається фазовий зсув, подаються на входи "Y" та "X" осцилографа, а його канал горизонтального відхилення треба перевести у режим підсилення. При цьому на екрані буде спостерігатися еліпс (рис. 3.4).

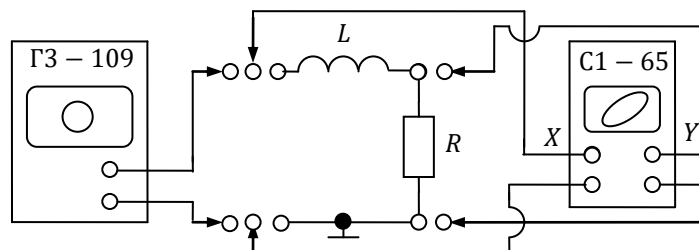


Рисунок 3.3 – Схеми для вимірювання зсуву фаз

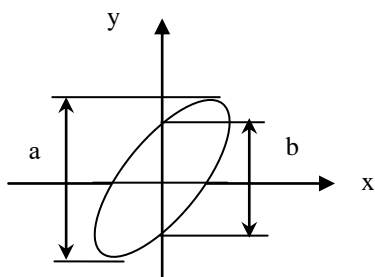


Рисунок 3.4

Тоді фазовий зсув між напругами можна знайти із співвідношення:

$$\varphi = \arcsin\left(\frac{b}{a}\right).$$

Для того, щоб результати вимірювань фазових зсувів методом еліпса відповідали дійсності, необхідно перед початком вимірювань перевірити, чи не вносять самі підсилювачі осцилографа фазові зсуви. Для цього треба подати на обидва входи одну і ту ж напругу і переконатися, що в цьому разі на екрані буде пряма лінія ($b = 0$, $\varphi = 0$).

3.2. Домашнє завдання

1. Для всіх схем, що надані на рис. 3.1, розрахувати вхідний опір, його активну і реактивну складові і фазовий зсув між напругою і струмом (параметри елементів для кожної бригади наведені у таблиці 5.1). Тобто розрахувати комплексний опір в показовому та алгебраїчному вигляді.

2. Для всіх схем розрахувати вхідну провідність, її активну і реактивну складові.

3. Накреслити трикутники опорів (для схем рис. 3.1 а,б,в) і провідностей (для схем рис 3.1 г, д, ж).

Привести розрахункові співвідношення. Результати розрахунків занести у таблицю 3.2.

Таблиця 3.1 – Варіанти завдань

Номер бригади	Параметри елементів схеми та частоти			
	R,кОм	L,Гн	C,нФ	f, кГц
1	4,7	0.1	6,8	2
2	12,0	0.1	3,9	3
3	3,6	0.1	3,9	10
4	5,6	0.1	10,0	12
5	6,8	0.1	1,3	11
6	4,7	0.01	10,0	15
7	6,8	0.01	15,0	20
8	5,6	0.01	20,0	15
9	6,8	0.01	3,9	16
10	5,6	0.01	4,7	18

Таблиця 3.2 – Порівняння розрахункових та експериментальних результатів

Схема	Результати домашнього завдання опори – кОм, провідності - мСім								Результати експерименту опори – кОм, провідності - мСім							
	R_{BX}	X_{BX}	$ Z_{BX} $	φ_z	g_{BX}	b_{BX}	$ Y_{BX} $	φ_y	R_{BX}	X_{BX}	$ Z_{BX} $	φ_z	g_{BX}	b_{BX}	$ Y_{BX} $	φ_y
а																
б																
в																
г																
д																
е																

Пояснення до таб.3.2.: $Z = R + jX = |Z|e^{j\varphi_z}; Y = g + jb = |Y|e^{j\varphi_y}$.

3.3. Лабораторне завдання

1. По черзі зібрати кожну із схем (рис 3.1) і провести вимірювання:

- напруг та струмів на всіх елементах;
- фазових зсувів між напругою генератора і струмом, що споживає схема (тобто аргументу комплексного вхідного опору або провідності).

Результати вимірювань занести до таблиці 3.3 (діючи значення напруг та струмів). Виконуючи вимірювання необхідно перевіряти виконання другого та першого законів Кірхгофа за формулами :

$$E = \sqrt{U_R^2 + (U_L - U_C)^2} - \text{для схем рис. 3.1 а, б, в (послідовне з'єднання),}$$

$$I_{\text{ВХ}} = \sqrt{I_R^2 + (I_L - I_C)^2} - \text{для схем рис. 3.1 г, д, ж (паралельне з'єднання).}$$

Таблиця 3.3 – Результати лабораторного дослідження

Схема	E [В]	U_R [В]	U_L [В]	U_C [В]	$I_{\text{вх}}$ мА	I_R мА	I_L мА	I_C мА	φ deg.	Розрахунок кореню
а	1									
б	1									
в	1									
г	1									
д	1									
е	1									

2. По отриманим експериментальним даним розрахувати вхідні опори і провідності кожної схеми та їх активну і реактивну складові. Результати занести у таблицю 3.3 та порівняти з теоретичними розрахунками.
3. Для кожної схеми побудувати векторні діаграми струмів і напруг. Масштаб вибрати таким, щоб гіпотенузи трикутників напруг (струмів) і опорів (провідностей) були однакові.

Примітка. Зсув фаз між напругою та струмом на вході схеми можна вимірювати як зсув фаз між напругою на вході схеми та напругою на резисторі, що послідовно увімкнений до гілки, де тече струм (на резисторі фаза напруги та струму однакові).

3.5. Комп'ютерне завдання

1. У програмі Multisim зібрати схему згідно варіанту завдання та підключити до неї генератор, вольтметри та осцилограф для вимірювання у простих послідовних колах, що подані на рис 3.5.

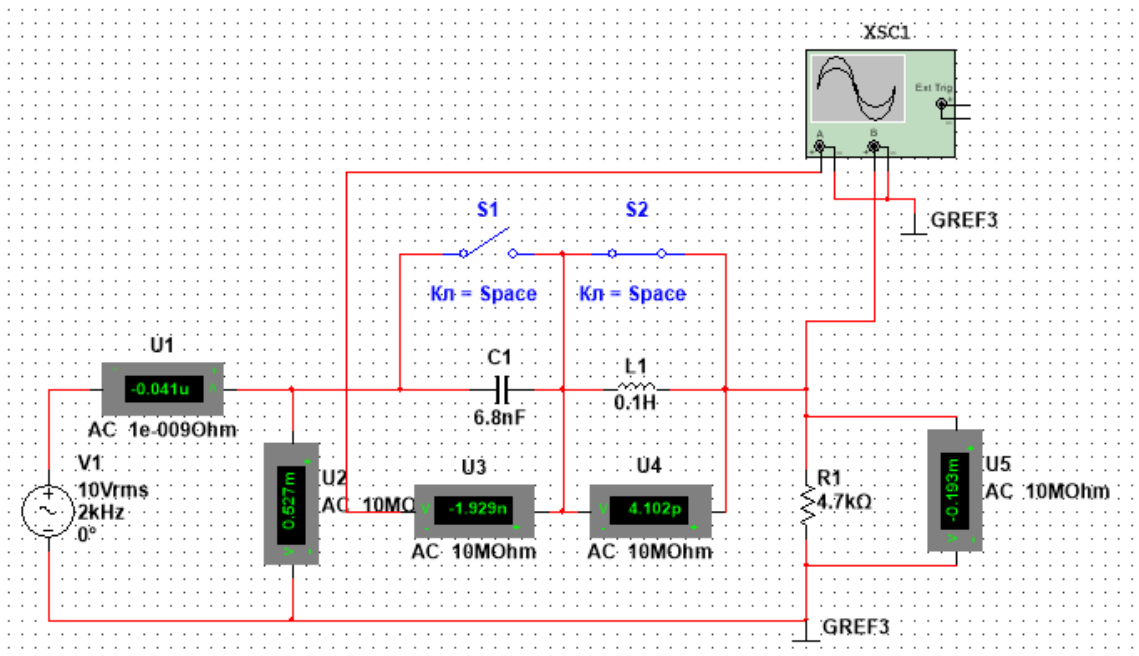


Рисунок 3.5 – Зразок схеми для дослідження послідовних кіл в Multisim

У якості генератора обрати елемент AC_Voltage в меню вибору компонентів Signal_Voltage_Sources - AC_Voltage (рис. 3.6).

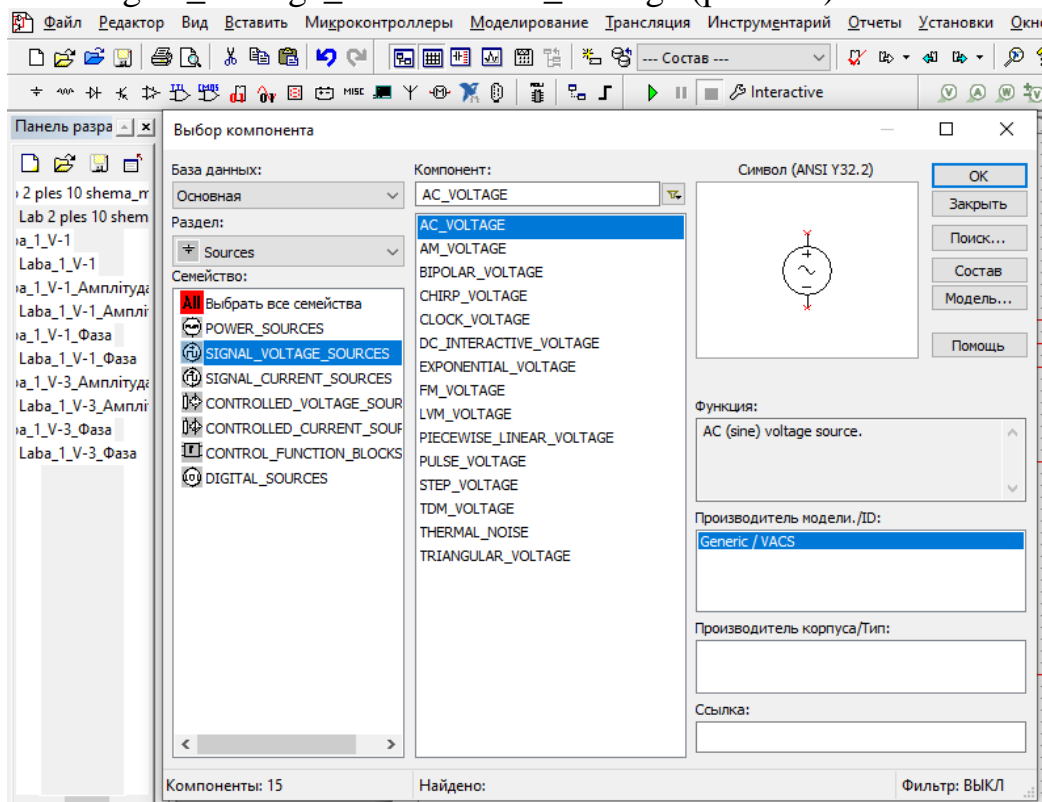


Рисунок 3.6 – Вікно вибору елемента AC_Voltage

В генераторі для зручності встановити вхідну напругу 10 В. Осцилограф

використовується, що визначити фазу коефіцієнта передачі в режимі гармонічних коливань (рис. 3.7).

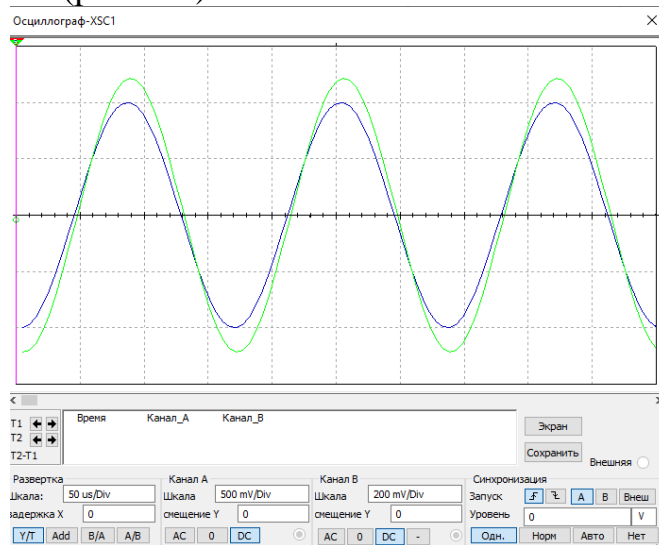


Рисунок 3.7 – Вікно осцилографу у режимі гармонічних коливань

Щоб перейти в режим вимірювання еліпса необхідно натиснути на кнопку внизу В/А (рис. 3.8).

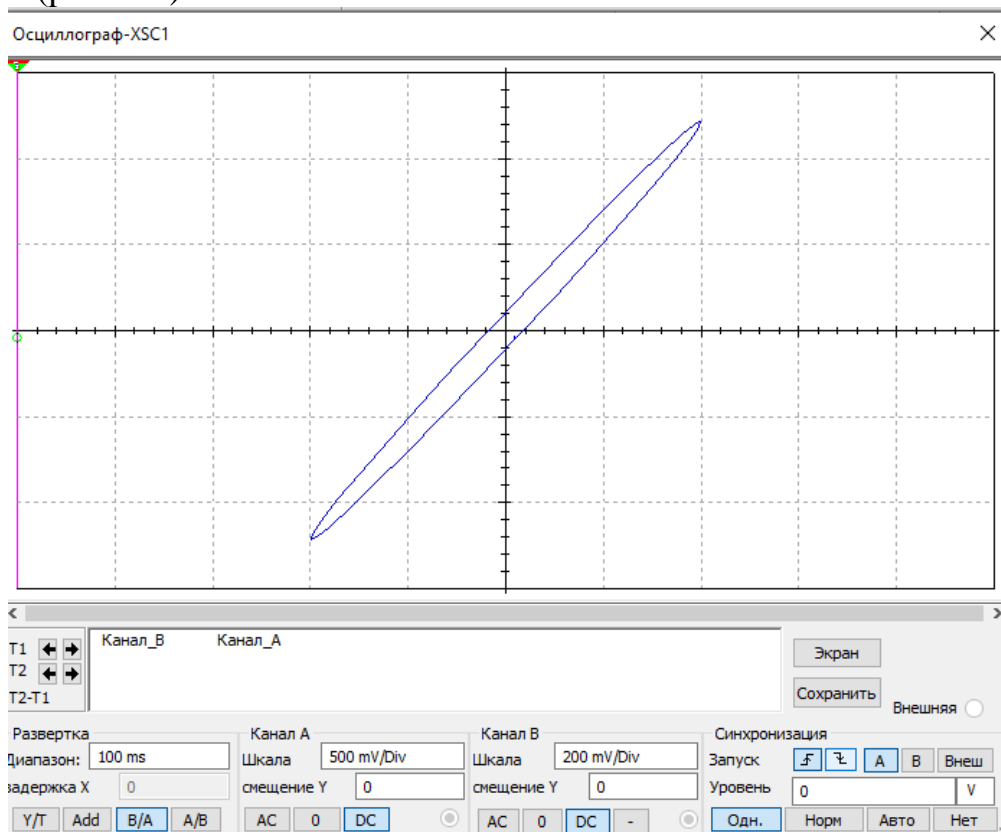


Рисунок 3.8 – Вікно осцилографу у режимі відображення еліпса

За допомогою еліпса визначаємо фази (рис. 3.9)

$$\Delta\varphi = \arcsin\left(\frac{b}{a}\right) \text{ [градуси].}$$

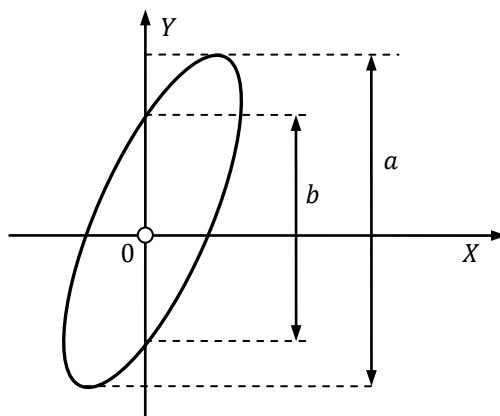


Рисунок 3.9 – Принцип вимірювання фази

Далі перемикаючі відповідні ключі, які замикають та розмикають пасивні елементи кола зібрати схеми та виміряти напруги на елементах та зсув фази у послідовних колах. Результати вимірів занести до таблиці 3.3.

2. У програмі Multisim зібрати схему згідно варіанту завдання та підключити до неї генератор, вольтметри та осцилограф для вимірювання у простих паралельних колах, що подані на рис 3.5.

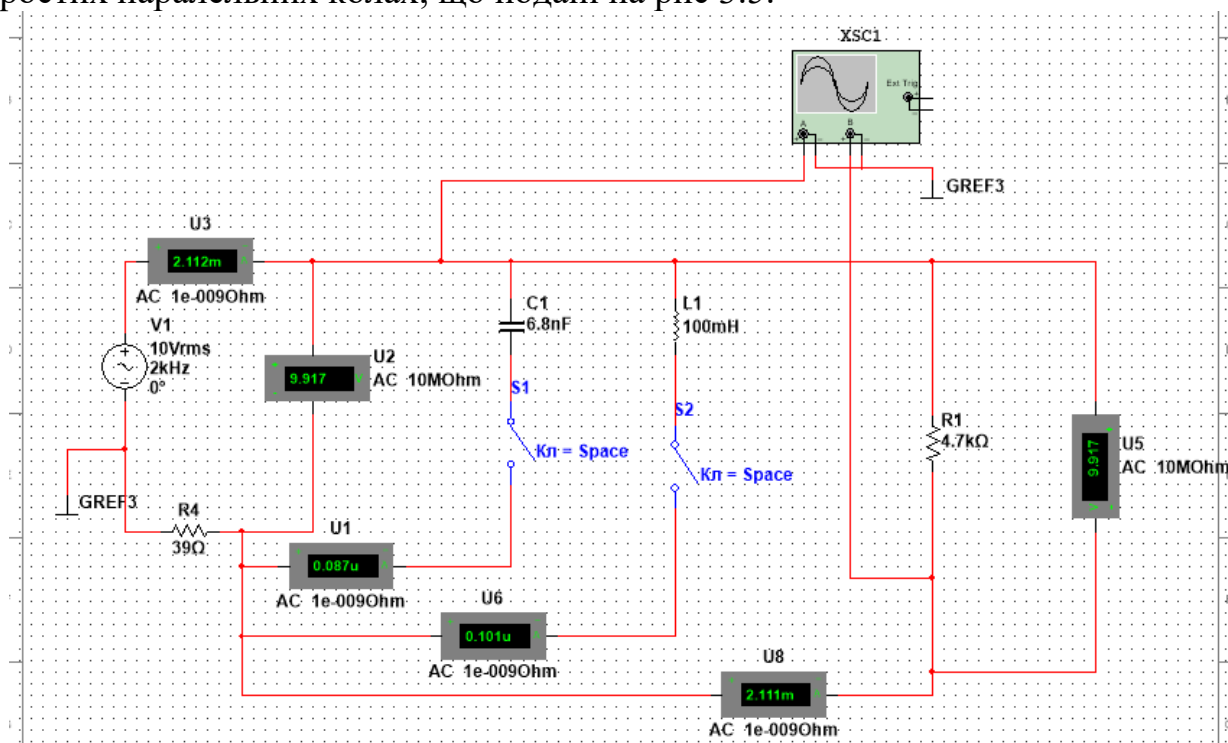


Рисунок 3.10 – Зразок схеми для дослідження паралельних кіл в Multisim

Далі перемикаючі відповідні ключі, які замикають та розмикають пасивні елементи кола зібрати схеми та виміряти напруги на елементах та зсув фази у паралельних колах. Результати вимірів занести до таблиці 3.3.

Для більш детального ознайомлення з методикою вимірювань у Multisim необхідно скористатися джерелами [2, 7].

3.6. Контрольні питання

1. Що таке гармонічний струм? Які основні параметри має такий струм?
2. Що таке діюче значення періодичного струму?
3. Що таке індуктивність? Які вона має якісні та кількісні характеристики?
4. Що таке ємність? Які вона має якісні та кількісні характеристики?
5. Як пов'язані між собою вхідна провідність і вхідний опір двополюсника?
6. Що називається активною та реактивною потужностями? В яких одиницях вони вимірюються?
7. В яких межах може знаходитись кут зсуву фази між струмом та напругою для кожної схеми?
8. Який сенс відображають терміни “комплексна амплітуда” та “поточний комплекс”? Які математичні операції можна з ними виконати?
9. Як використовувати закони Кірхгофу, якщо вони записані в символічній (комплексній) формі?
10. Поняття про комплексні числа та форми їх запису. Формули їх переходу.
11. Що таке реактивний опір індуктивності та ємності? Як він визначається?
12. Що таке реактивна провідність індуктивності та ємності? Як вона визначається?
13. Що таке комплексний опір реактивних елементів? Як вони визначаються?
14. Що таке комплексна провідність реактивних елементів? Як вона визначається?
15. Які особливості зсуву фази між струмом та напругою на активному опорі, на реактивному опорі (ємності, індуктивності)?
16. Як будується векторна діаграма струмів та напруг для кола із послідовним з'єднанням опорів, індуктивності та ємності?
17. Як будується векторна діаграма струмів та напруг для кола із паралельним з'єднанням опорів, індуктивності та ємності?

4.Лабораторна робота №4. ПОСЛІДОВНИЙ КОЛИВАЛЬНИЙ КОНТУР

Мета роботи: експериментальне дослідження процесів у послідовному коливальному контурі.

Прилади та макети: макет "Коливальні кола"; генератор стандартних сигналів типу Г4-18А; вольтметр типу ВЗ-2А, ВЗ-38Б; резистори 100кОм, 1МОм, конденсатор ємністю 300пФ, замикачі.

4.1.Опис макета

У роботі використовується лабораторний макет "Коливальні кола", електрична схема якого показана на лицевій панелі макету (рис.4.1).

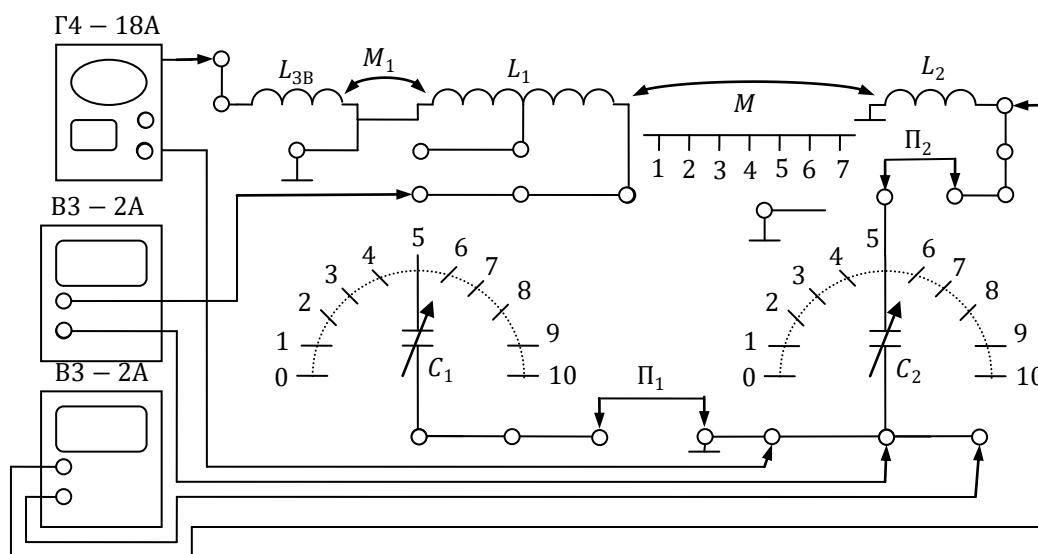


Рисунок 4.1 – Макет коливальні кола

При дослідженні послідовного коливального контуру останній складається з котушки індуктивності L_1 і конденсатора C_1 (рис. 4.2).

Як джерело живлення використовується генератор типу Г4-18А, що вмикається до контуру через котушку $L_{3В}$. Значення $L_{3В}$, і M_1 вибрано з умови, що напруга, наведена в L_1 може вважатися увімкненою до контуру послідовно. Напруга на контурі вимірюється вольтметром типу ВЗ-2А (або ВЗ-38Б), який підключають до конденсатора C_1 .

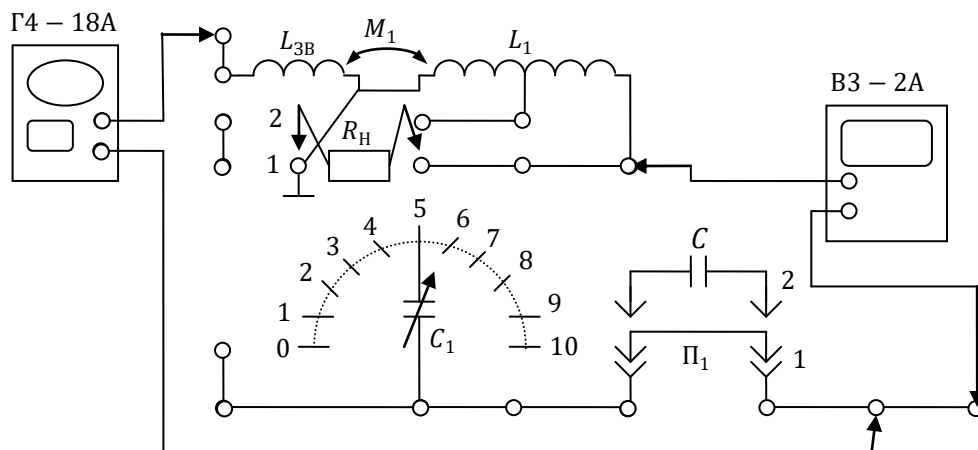


Рисунок 4.2 – Схема для дослідження

4.2. Домашнє завдання

1. Підготувати розрахункові співвідношення, які дозволять за відомою ємністю контуру, резонансною частотою і смугою пропускання визначити добротність Q , характеристичний опір ρ , індуктивність L_1 , активний опір r і постійну часу контуру τ .

2. Вивести формулу, яка дозволяє урахувати вплив на добротність послідовного контуру опору навантаження, що підключається паралельно до одного з реактивних елементів, якщо $R_H \gg \rho$.

4.3. Лабораторне завдання

1. Зібрати схему дослідження послідовного контуру (рис.4.1). Включити замикачу і встановити ротор конденсатора C_1 в районі середнього положення. Знайти резонансну частоту контуру f_0 , змінюючи частоту генератора Г4-18А. (Змінюючи ємність C_1 бажано встановити значення частоти кратне 5 кГц : 140 , 145, 150, 155 або 160, 165 кГц).

Визначити ціну поділки ноніуса навколо f_0 . Значення ємності переписати з графіка, що на макеті. Заповнити таблицю 4.1.

Таблиця 4.1

f_0 , кГц	Ціна поділки, Гц	$\omega_0 = 2\pi f_0$, рад/с	C_1 , пФ	$\rho = 1/\omega_0 C_1$, Ом	$L_1 = \rho / \omega_0$, мГн

2. Змінюючи частоту генератора, зняти залежність напруги на контурі від частоти $K(f) = U_{C_1}(f)$. Цю залежність краще будувати від $\Delta f = f - f_0$, встановивши $K(f_0) = 1\text{В}$. Одразу будуйте графік, де по абсцисі відкладайте поділки ноніуса, а поруч намалюйте шкалу в кГц. Вимірте смугу перепуску в поділках ноніуса і переведіть її в Гц, визначте добротність Q_1 та опір втрат :

$$\Pi_1 = \text{_____ кГц}; Q_1 = f_0 / \Pi_1 = \text{_____}; r_2 = \rho / Q_2 = \text{_____ Ом}$$

3. Підключити паралельно конденсатору C_1 опір навантаження $R_H = 100$ кОм і звернути увагу на те, що на частоті резонансу $U_K(f_0)$ упаде з 1 В до деякого рівня $U_{K2}(f_0) = \underline{\hspace{2cm}}$ В (це буде коефіцієнт перерахунку нормованої резонансної кривої в ненормовану). Генератором довести рівень $U_K(f_0)$ до одиниці і знову зняти залежність $U_K(f)$. Як і в пункті 2 визначити:

$\Pi_2 = \underline{\hspace{2cm}}$ кГц ; $Q_2 = f_0/\Pi_2 = \underline{\hspace{2cm}}$; $r_2 = \rho/Q_2 = \underline{\hspace{2cm}}$ Ом
 Перевірити, що Q_2/Q_1 дорівнює $U_{K2}(f_0)/1$.

4. Відімкнути опір R_H , послідовно із C_1 (замість перемикачки) увімкнути конденсатор $C = 300$ пФ. Настроїти контур в резонанс, звернути увагу на збільшення значення напруги $U_{K3}(f_0)$ на новій резонансній частоті відносно 1, що була в пункті 2 при тому ж рівні вихідної напруги генератора. Визначити нову поділку ділення ноніуса навколо нової f_0 . Знов встановити $U_K(f_0) = 1$ і зняти залежність $U_K(f)$. Навести такі данні:

Таблиця 4.2

f_0 , кГц	Ціна поділки, Гц	$\omega_0 = 2\pi f_0$, рад/с	$C_E = \frac{C_1 \cdot C}{C_1 + C}$, пФ	$\rho_2 = 1/\omega_0 C_E$, Ом	$L_1 = \rho/\omega_0$, мГн	$U_{k3}(f_0)$

$\Pi_3 = \underline{\hspace{2cm}}$ кГц ; $Q_3 = f_0/\Pi_3 = \underline{\hspace{2cm}}$; $r_3 = \rho/Q_3 = \underline{\hspace{2cm}}$ Ом

5. Порівняти результати обчислень усіх параметрів контуру в пунктах 1-4.
 6. Побудувати усі криві на одному графіку в абсолютній системі координат, а на другому - в відносній.

ПРИМІТКИ

1. Відлік резонансних частоти і частот, що визначають смугу пропускання контурів, потрібно проводити з максимально можливою точністю за допомогою ноніуса.

2. При виконанні п.п, 5 і 6 контур необхідно підстроювати в резонанс, тому що при перемиканні вольтметра резонансна частота контуру декілька змінюється за рахунок вхідної ємності вольтметра.

7. За результатами вимірювань розрахувати опори власних втрат контуру І-го виду і внесений з боку генератора опір втрат в послідовний контур з додатковим конденсатором ємністю $C = 300$ пФ.

4.4. Домашнє завдання

1. У послідовному контурі (рис. 4.3) визначити резонансну частоту ω_0 [рад/мкс] та f_0 [кГц], характеристичний опір, добротність, смугу пропускання в [рад/мкс] та [кГц]. Знайти вхідний опір на резонансній частоті $r_{вх}(\omega_0)$. Визначити напругу на контурі $U_K(\xi)$, $U_K(\omega)$ та $U_K(f)$ із врахуванням опору навантаження та без нього. Побудувати модулі цих напруг на одному графіку. Числові значення елементів кола обрати згідно номеру бригади.

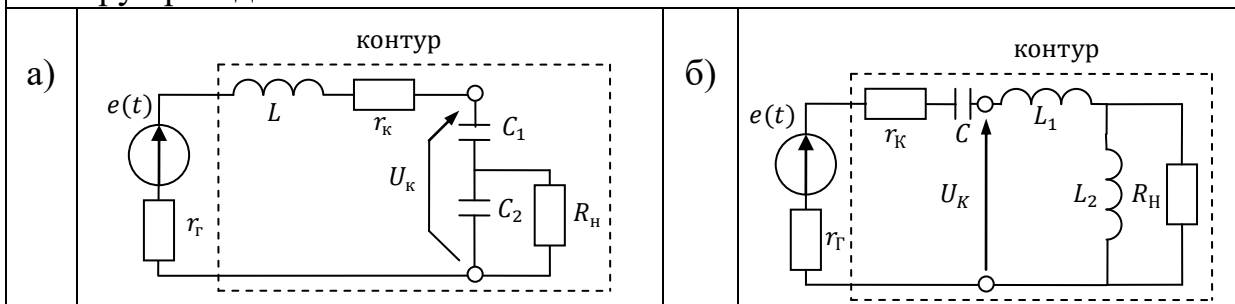


Рисунок 4.3 – Схема для розрахунків

1	Схема а: $r_K = 6,5 \text{ Ом}$, $r_\Gamma = 9 \text{ Ом}$, $R_H = 100\text{к Ом}$, $L = 4,2 \text{ мГн}$, $C_1 = 4 \text{ нФ}$, $C_2 = 5 \text{ нФ}$;	1	Схема б: $r_K = 5,5 \text{ Ом}$, $r_\Gamma = 12 \text{ Ом}$, $R_H = 100\text{к Ом}$, $C = 3,5 \text{ нФ}$, $L_1 = 8 \text{ мГн}$, $L_2 = 4 \text{ мГн}$;
2	Схема а: $r_K = 7,5 \text{ Ом}$, $r_\Gamma = 11 \text{ Ом}$, $R_H = 120\text{к Ом}$, $L = 3,2 \text{ мГн}$, $C_1 = 2 \text{ нФ}$, $C_2 = 7 \text{ нФ}$;	2	Схема б: $r_K = 2,5 \text{ Ом}$, $r_\Gamma = 8,2 \text{ Ом}$, $R_H = 85 \text{ кОм}$, $C = 4,8 \text{ нФ}$, $L_1 = 5 \text{ мГн}$, $L_2 = 7 \text{ мГн}$;
3	Схема а: $r_K = 4,8 \text{ Ом}$, $r_\Gamma = 12 \text{ Ом}$, $R_H = 80\text{к Ом}$, $L = 5,8 \text{ мГн}$, $C_1 = 6 \text{ нФ}$, $C_2 = 4 \text{ нФ}$;	3	Схема б: $r_K = 3,4 \text{ Ом}$, $r_\Gamma = 12 \text{ Ом}$, $R_H = 125\text{к Ом}$, $C = 5,2 \text{ нФ}$, $L_1 = 4 \text{ мГн}$, $L_2 = 8 \text{ мГн}$;
4	Схема а: $r_K = 7,8 \text{ Ом}$, $r_\Gamma = 6 \text{ Ом}$, $R_H = 140\text{к Ом}$, $L = 7,7 \text{ мГн}$, $C_1 = 3 \text{ нФ}$, $C_2 = 7 \text{ нФ}$;	4	Схема б: $r_K = 6,5 \text{ Ом}$, $r_\Gamma = 12 \text{ Ом}$, $R_H = 175\text{к Ом}$, $C = 6,7 \text{ нФ}$, $L_1 = 6 \text{ мГн}$, $L_2 = 3 \text{ мГн}$;
5	Схема а: $r_K = 6,3 \text{ Ом}$, $r_\Gamma = 14 \text{ Ом}$, $R_H = 160\text{к Ом}$, $L = 4,3 \text{ мГн}$, $C_1 = 6 \text{ нФ}$, $C_2 = 2 \text{ нФ}$;	5	Схема б: $r_K = 7,5 \text{ Ом}$, $r_\Gamma = 12 \text{ Ом}$, $R_H = 200\text{к Ом}$, $C = 9,3 \text{ нФ}$, $L_1 = 2 \text{ мГн}$, $L_2 = 4 \text{ мГн}$;
6	Схема а: $r_K = 2,4 \text{ Ом}$, $r_\Gamma = 9,7 \text{ Ом}$, $R_H = 134\text{к Ом}$, $L = 8,2 \text{ мГн}$, $C_1 = 7,2 \text{ нФ}$, $C_2 = 3,7 \text{ нФ}$;	6	Схема б: $r_K = 3,5 \text{ Ом}$, $r_\Gamma = 13 \text{ Ом}$, $R_H = 50\text{к Ом}$, $C = 7,5 \text{ нФ}$, $L_1 = 6 \text{ мГн}$, $L_2 = 9 \text{ мГн}$;

4.5. Комп'ютерне завдання

1. У програмі Multisim зібрати схема для дослідження послідовного контуру згідно варіанту (рис. 4.2 а), яку подано на рис.4.4. Варіанти завдань представлені у таблиці 4.3. В якості генератор обрати функціональний генератор, в якому встановити режим гармонічних коливань та розраховано резонансну частоту та вхідну напругу 1 В.

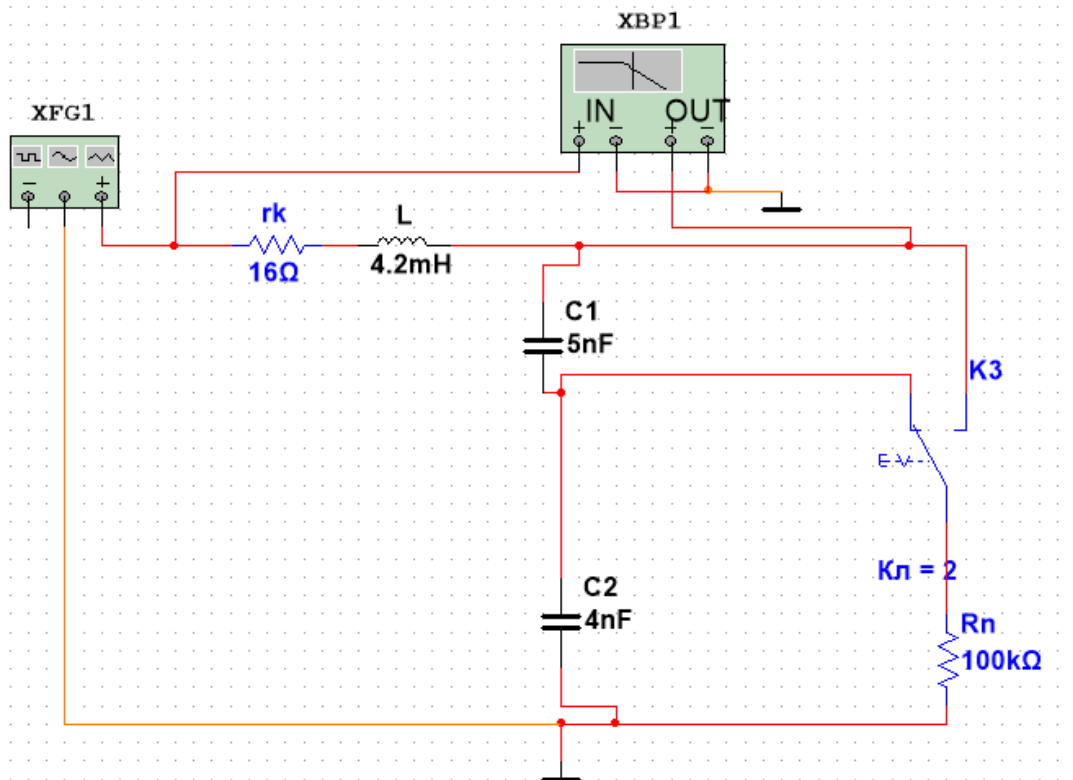


Рисунок 4.4 – Схема послідовного контуру в Multisim

У схемі ключ використовується, щоб перемкнути опір навантаження до всієї ємності або її частини. У цьому завданні за допомогою вимірювача АЧХ (Плотера Боде) зняти АЧХ та ФЧХ контуру від частоти для повного та часткового включення ємності у лінійному та логарифмічному масштабі. Порівняти отримані графіки із тими, що були отримані у домашньому завданні. За графіками виміряти смугу пропускання у лінійному та логарифмічному масштабі. Порівняти із розрахунковими. Данні занести у відповідну таблицю. Зробити висновок про те, як опір навантаження впливає на смугу пропускання при повному включенні до ємності контуру та частковому включенні до ємності C2.

Таблиця 4.3 – Результати вимірювання контуру

f_0 , кГц	Смуга пропускання, П, кГц			Добротність	
	Розраховане вдома	Виміряне лінійне	Виміряне, логарифмічне	Порахована вдома	Порахована на заняті

Для розрахунку добротності за вимірної смугою пропускання використовувати формулу

$$Q_3 = f_0 / \Pi_3$$

Отримати частотні характеристики контуру можна за допомогою вимірювача АЧХ (рис. 4.5).

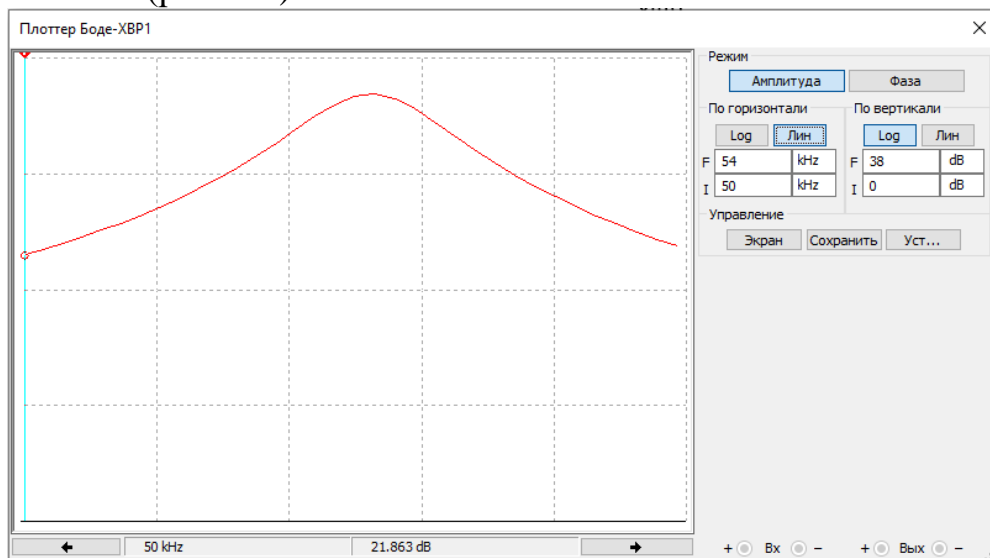


Рисунок 4.5 – Вікно налаштування частотних характеристик

Налаштувати частотні характеристики можна використовуючи відповідне меню. За допомогою Режиму можна відображати АЧХ (кнопка «амплітуда») або ФЧХ (кнопка «фаза»). Обравши меню по горизонталі та вертикалі можна налаштувати діапазон, що буде відображатися для АЧХ. Клавiша «екран» дозволяє інвертувати зображення частотних характеристик. Також можна обрати логарифмічний або лінійний режим. Доцільно обрати максимальне і мінімальне значення діапазонів по частоті не більше 10% від значення резонансної частоти.

За АЧХ здійснити вимірювання смуги пропускання.

Смуга пропускання – це діапазон зміни частот, у межах якого амплітудно-частотна характеристика резонансної кривої струму або напруги не опускається нижче максимального значення, поділеного на $\sqrt{2}$ (рис. 4.6), тобто $A_{max}/\sqrt{2}$.

Смуга пропускання

$$\Pi = \frac{f_0}{Q}$$

Отже видно, що чим більша добротність, тим менша смуга пропускання.

Крім того, із рис. 2 бачимо, що

$$\Pi = f_2 - f_1 = 2\Delta f.$$

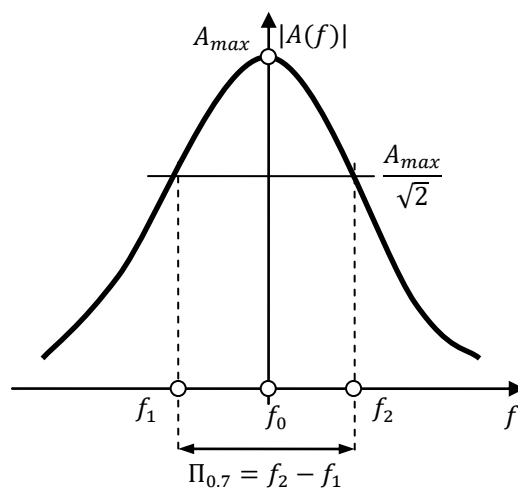


Рисунок 4.6 – Визначення смуги

Сму́га пропускання – це діапазон зміни частот, у межах якого амплітудно-частотна характеристика резонансної кривої струму або напруги не опускається нижче ніж 3дБ від максимального рівня (рис. 4.7).

Значення коефіцієнта передачі на границях смуги пропускання

$$K_p = 20 \cdot \log \left[\frac{1}{\sqrt{2}} \right] = -3 \text{ дБ.}$$

Крім того, із рис. 3 бачимо, що

$$\Pi_{-3 \text{ дБ}} = f_2 - f_1 = 2\Delta f.$$

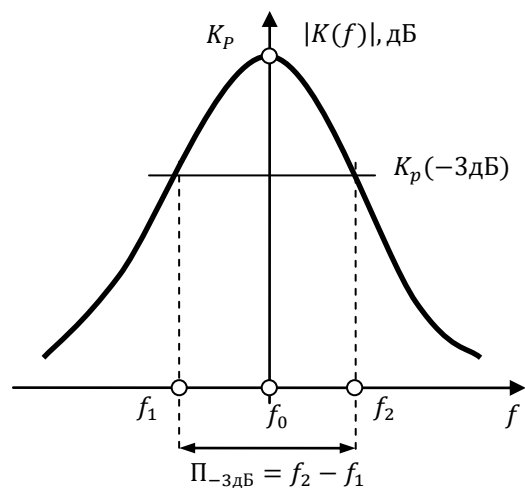


Рисунок 4.7 – Визначення смуги

Значення коефіцієнта передачі за напругою на резонансній частоті для послідовного контуру (рис. 1 а) у дБ визначається

$$K_p = 20 \cdot \log[Q].$$

2. Підключити вольтметри до контуру для вимірювання коефіцієнту включення (рис. 4.8). Виміри роботи на резонансній частоті.

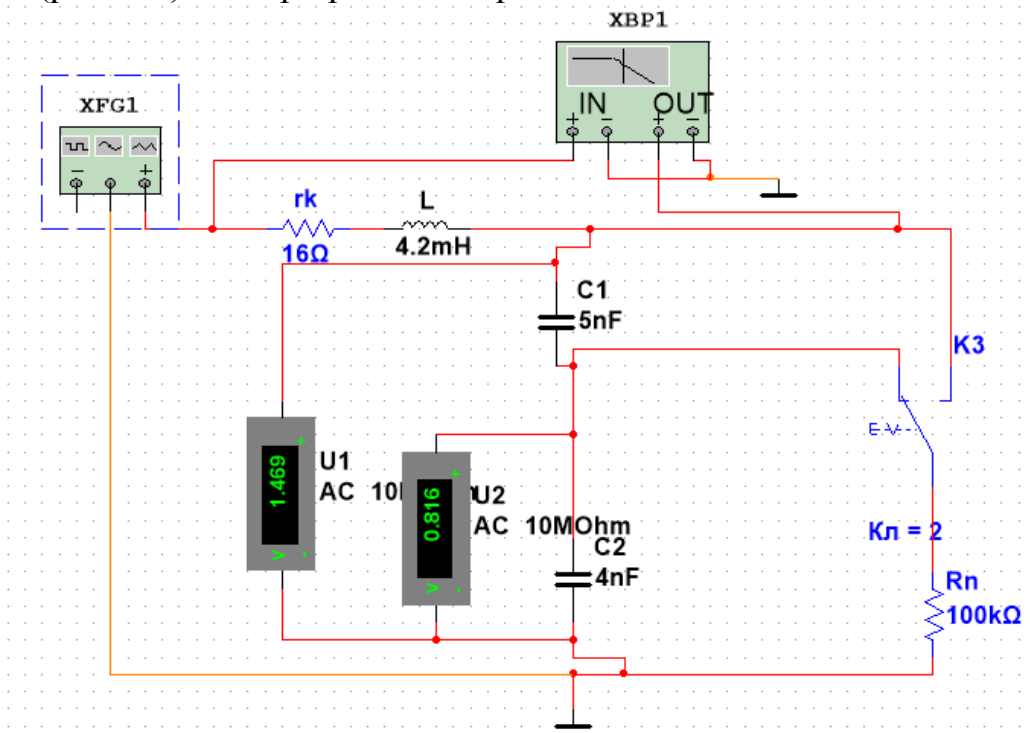


Рисунок 4.5 – Налаштування блоку Bode Plotter

Результати вимірювань занести до таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 – Результати вимірювання коефіцієнту включення

Коефіцієнт включення, p	Вимірне значення	Пораховане значення

Для розрахунку коефіцієнта включення за вимірними напругами використовувати формулу

$$p = \frac{U_{C2}}{U_{3AG}}$$

3. У програмі Multisim зібрати схема для дослідження послідовного контуру згідно варіанту (рис. 4.2 б) та встановити опір навантаження 1 МОм. Зняти АЧХ контуру. Виміряти смугу пропускання та порівняти із смугою пропускання, що була отримана у пункті1. Зробити висновки я впливає опір навантаження на смугу пропускання. Навести скріпи вимірювань

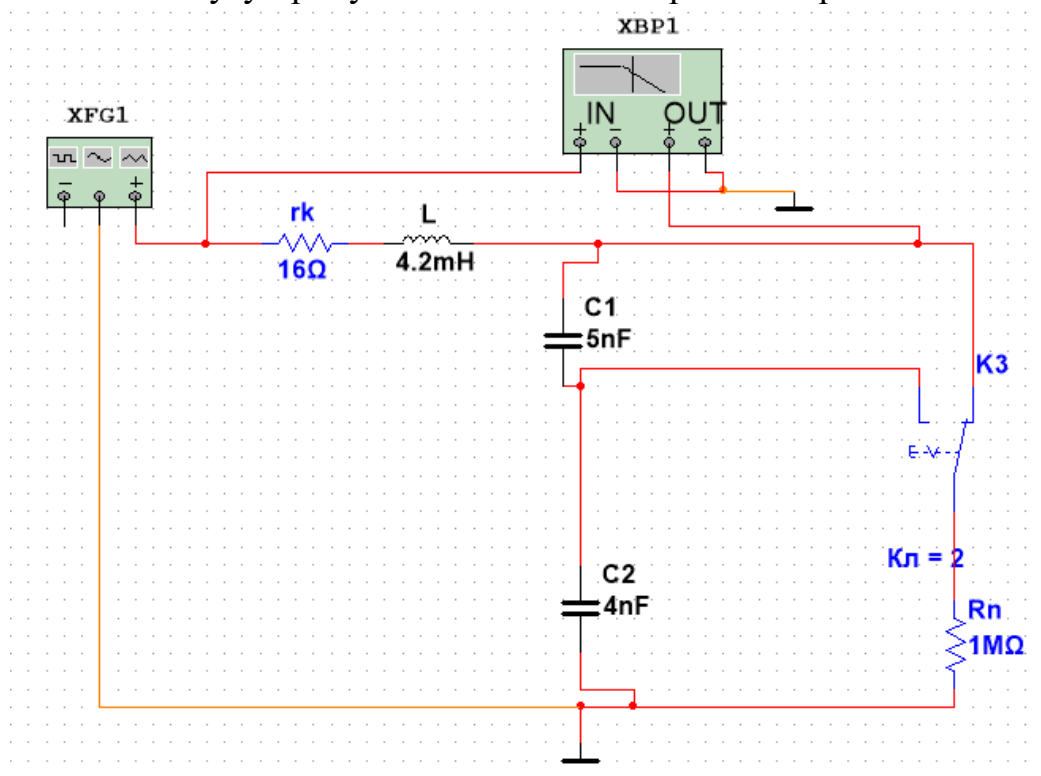


Рисунок 4.6 – Налаштування блоку Bode Plotter

4. У програмі Multisim зібрати схема для дослідження послідовного контуру згідно варіанту (рис. 4.2 б). Зробити всі виміри для цієї схеми, що і були зроблені для схеми а (пункти 1-3). Навести скріпи вимірювань. Для розрахунку коефіцієнта включення за вимірними напругами використовувати формулу

$$p = \frac{U_{L2}}{U_{3AG}}$$

4.6. Контрольні питання

1. Що таке вибірність або селективність?
2. Що таке коливальний контур?
3. Що таке резонанс?
4. Що таке резонанс струмів та резонанс напруг? В яких колах виникають?
5. Поняття про резонансу частоту та спосіб її обчислення.
6. Поняття про характеристичний опір та спосіб його обчислення.
7. Поняття про добротність послідовного та паралельного контуру та способи її обчислення.
8. Яка методика визначення резонансної частоти у колах?
9. Поняття про смугу пропускання послідовного та паралельного контуру та способи її обчислення.
10. Як визначається вхідний опір послідовного та паралельного контурів?
11. Що розуміється під узагальненою розстройкою?
12. Як опір генератора внутрішньо впливає на добротність і смугу пропускання послідовного та паралельного контурів?
13. Як визначити добротність контуру за його фазовою характеристикою?
14. Намалюйте вхідні частотні характеристики послідовного та паралельного контурів?
15. Чи відповідає опір втрат в котушці індуктивності її опору, який виміряне на постійному струмі?
16. Властивості та області застосування контурів II та III виду.
17. Як визначаються коефіцієнти включення для контурів II та III виду?

5.Лабораторна робота №5. ПАРАЛЕЛЬНИЙ КОЛИВАЛЬНИЙ КОНТУР

Мета роботи: експериментальне дослідження процесів в коливальному контурі послідовного та паралельного живлення.

Прилади та макети: макет "Коливальні кола"; генератор стандартних сигналів типу Г4-18А; вольтметр типу ВЗ-2А, ВЗ-38Б; резистори 100кОм, 1МОм, конденсатор ємністю 300пФ, замикачі.

5.1.Опис макета

У роботі використовується лабораторний макет "Коливальні кола", електрична схема якого показана на лицевій панелі макету (рис. 5.1).

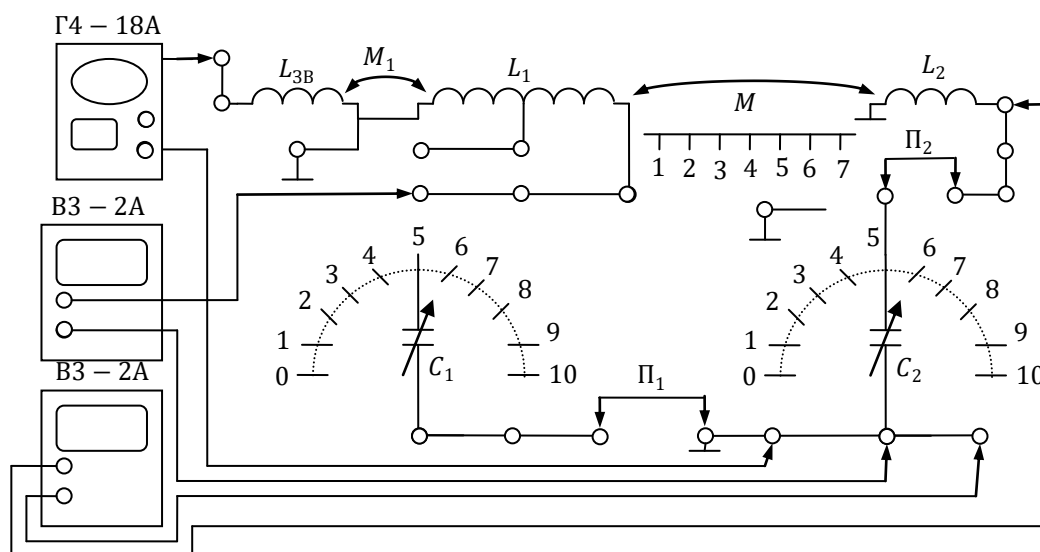


Рисунок 5.1 – Модуль коливальні кола

При дослідженні паралельного контуру останній складається з котушки L_1 та послідовно увімкнених конденсаторів C_1 і C (конденсатор C включається додатково, рис. 5.2).

Наявність середнього виводу у котушки L_1 і послідовно включених C_1 і C дає можливість збирати контури другого та третього видів. Як джерело живлення паралельного контуру використовується генератор Г4-18А. Для забезпечення живлення контуру від джерела струму послідовно з генератором передбачено підключення додаткового опору R_H (рис. 5.2). Напруга на контурі вимірюється вольтметром ВЗ-2А або ВЗ-38Б.

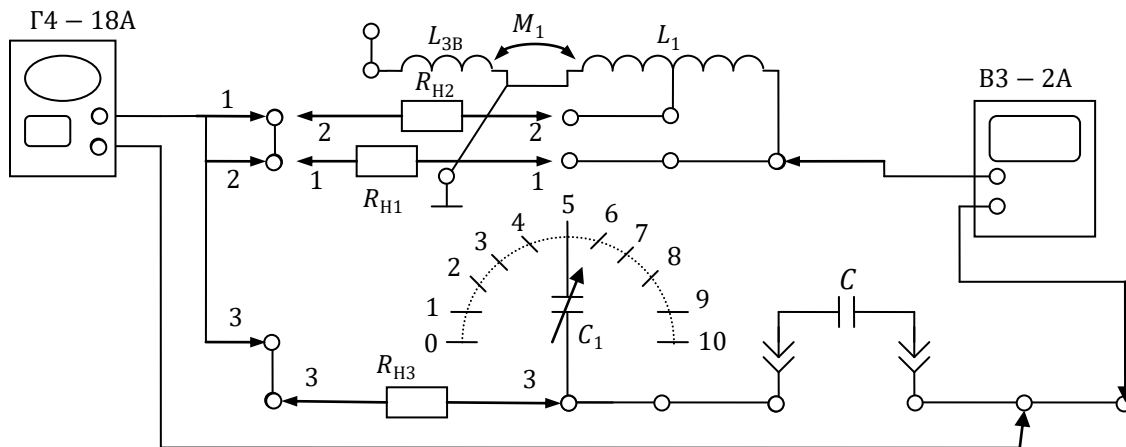


Рисунок 5.2 – Підключення паралельного контуру

5.2. Домашнє завдання

1. Підготувати розрахункові співвідношення, які дозволять за відомою ємністю контуру, резонансною частотою і смугою пропускання визначити добротність Q , характеристичний опір ρ , індуктивність L_1 , активний опір r і постійну часу контуру τ .

2. Вивести формулу, яка дозволяє урахувати вплив на добротність послідовного контуру опору навантаження, що підключається паралельно до одного з реактивних елементів, якщо $R_H \gg \rho$.

3. Підготувати розрахункові співвідношення, які дозволяють урахувати вплив на добротність, смугу пропускання паралельного контуру I, II и III видів внутрішнього опору генератора R_i .

4. Обміркувати методику експериментального визначення коефіцієнтів включення контуру за допомогою вольтметра, якщо $R_H \gg R_{e0}$.

5.3. Лабораторне завдання

1. Зібрати схему дослідження паралельного контуру I-го виду. Для цього послідовно з конденсатором C_1 увімкнути конденсатор $C = 300$ пФ і послідовно з генератором увімкнути додатковий резистор $R_i = 1$ МОм, щоб наблизити його до джерела струму (рис. 4.2). Звернути увагу на те, що резонансна частота практично залишиться такою ж, як в п.5 для послідовного контуру (контурі однакові а схеми живлення різні!). У зв'язку з тим, що послідовно до генератора додали великий опір, треба підняти рівень вихідної напруги генератора, а шкалу вольтметра перевести на 100 мВ. Якщо резонансна частота трошки зміниться, то записати її нове значення

$$f_0 = \underline{\hspace{2cm}} \text{ кГц.}$$

2. Змінюючи частоту генератора зняти залежність напруги на контурі від частоти $U_K(f) = U_C(f)$. Визначити добротність, характеристичний опір ρ_3 (по відомій ємності контуру), розрахувати вхідний опір контуру при резонансі $R_{\text{Эр1}}$.

$$\left. \begin{aligned} \Pi_4 = \text{_____ кГц}; Q_4 = f_0/\Pi_4 = \text{_____}; \rho_3 = 1/\omega_0 C_e = \text{_____ Ом}; \\ r_4 = \rho_3/Q_4 = \text{_____ Ом}; R_{\text{Эр1}} = Q_4 * \rho_3 = \text{_____ кОм}. \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} \text{Для} \\ R_H = 1 \text{МОм} \\ \text{Контур 1-го} \\ \text{виду.} \end{array}$$

Зверніть увагу на те, що ρ_3 та ρ_2 практично однакові, тому що ємність однакова і резонансна частота практично не змінилася. Опір r_4 практично можна вважати опором самого контуру, тому що при $R_i = 1 \text{ МОм}$ внесеним опором можна знехтувати.

3. Зменшити внутрішній опір генератора шляхом заміни додаткового резистора $R_i = 1 \text{ МОм}$ на резистор $R_i = 100 \text{ кОм}$. Знову зняти залежність $U_K(f)$ і визначити еквівалентну добротність Q_5 . Вважаючи добротність Q_4 , визначену в п. 2., власною (без урахування внесеного опору), обчислити еквівалентну добротність і порівняти розраховане і експериментальне значення Q_5 .

$$\left. \begin{aligned} \Pi_5 = \text{_____ кГц}; Q_5 = f_0/\Pi_5 = \text{_____}; r_5 = \rho_3/Q_5 = \text{_____} \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} \text{Для} \\ R_H = 100 \text{кОм} \\ \text{Контур 1-го} \\ \text{виду.} \end{array}$$

Розрахунок теоретичного значення Q_5 :

внесений опір $r_{\text{вн5}} = (\rho_3)^2 / R_i = (\rho_3)^2 / 10^5 = \text{_____ Ом}$; теоретичне значення всіх втрат r_5 : $r_{5T} = r_{\text{вн5}} + r_4 = \text{_____ Ом}$;
теоретичне значення $Q_{5T} = \rho_3 / r_{5T} = \text{_____}$.

4. Зібрати схему дослідження контуру II-го виду, використовуючи як додатковий резистор $R_i = 100 \text{ кОм}$ і зняти залежність $U_K(f)$. Визначити смугу та еквівалентну добротність Q_6 .

$$\left. \begin{aligned} \Pi_6 = \text{_____ кГц}; Q_6 = f_0/\Pi_6 = \text{_____} \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} \text{Для } R_H = 100 \text{кОм} \\ \text{Контур 2-го виду.} \end{array}$$

5. Змінити резистор $R_i = 100 \text{ кОм}$ на 1 МОм визначити коефіцієнт включення p .

Визначення коефіцієнта включення p : $p = U_{L1} / U_L =$

6. Повторити п. 5 для контуру III-го виду. По відомим значенням C_1 і C визначити коефіцієнт включення і порівняти його з тим, що отримали експериментально.

Визначення коефіцієнта включення p : $p = U_{C1}/U_C =$

Теоретичне значення $p_T = C_1/(C_1 + C) =$ _____.

ПРИМІТКИ

1. Відлік резонансних частоти і частот, що визначають смугу пропускання контурів, потрібно проводити з максимально можливою точністю за допомогою ноніуса.

2. При виконанні п.п. 5 і 6 контур необхідно підстроювати в резонанс, тому що при перемиканні вольтметра резонансна частота контуру декілька змінюється за рахунок вхідної ємності вольтметра.

7. Побудувати зняті залежності на одному графіку в координатах: нормована напруга на контурі U_K/U_{KP} - абсолютне розстроєння Δf . Обчислити смуги пропускання контурів I-го і II-го виду при опорі генератора $R_i = 100$ кОм, використовуючи результати пп. 2 - 5 і порівняти їх зі значеннями, отриманими експериментально. Пояснити отримані результати.

8. За результатами вимірювань розрахувати опори власних втрат контуру I-го виду і внесений з боку генератора опір втрат в послідовний контур з додатковим конденсатором ємністю $C = 300$ пФ.

5.4. Домашнє завдання

1. У паралельному контурі (рис. 4.3) визначити резонансну частоту ω_0 [рад/мкс] та f_0 [кГц], характеристичний опір, добротність, смугу пропускання в [рад/мкс] та [кГц]. Знайти вхідний опір на резонансній частоті $R_E(\omega_0)$. Знайти коефіцієнт включення. Визначити напругу на контурі $U_K(\xi)$, $U_K(\omega)$ та $U_K(f)$ із врахуванням опору навантаження та без нього. Побудувати модулі цих напруг на одному графіку. Числові значення елементів кола обрати згідно номеру бригади. Для всіх бригад опір генератора $R_\Gamma = 1$ кОм, амплітуда напруги генератора $E = 1$ В.

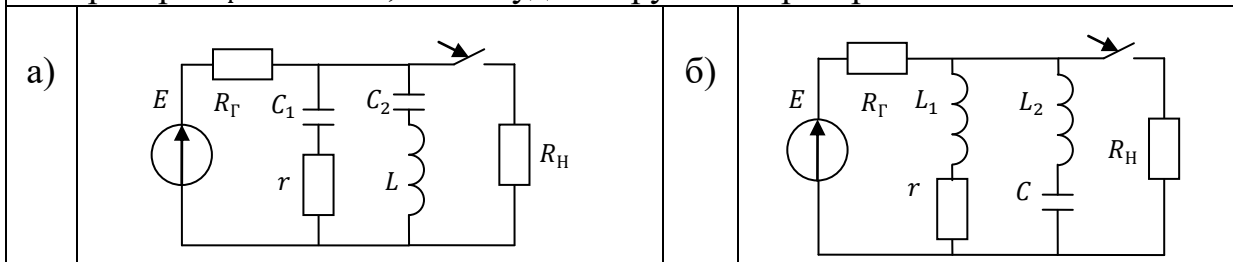


Рисунок 5.3 – Схема для розрахунків

1	Схема а: $r = 6,5$ Ом, $R_H = 100$ к Ом, $L = 4,2$ мГн, $C_1 = 4$ нФ, $C_2 = 5$ нФ;	1	Схема б: $r = 5,5$ Ом, $R_H = 100$ к Ом, $C = 3,5$ нФ, $L_1 = 8$ мГн, $L_2 = 4$ мГн;
2	Схема а: $r = 7,5$ Ом, $R_H = 120$ к Ом, $L = 3,2$ мГн, $C_1 = 2$ нФ, $C_2 = 7$ нФ;	2	Схема б: $r = 2,5$ Ом, $R_H = 85$ кОм, $C = 4,8$ нФ, $L_1 = 5$ мГн, $L_2 = 7$ мГн;
3	Схема а: $r = 4,8$ Ом, $R_H = 80$ к Ом, $L = 5,8$ мГн, $C_1 = 6$ нФ, $C_2 = 4$ нФ;	3	Схема б: $r = 3,4$ Ом, $R_H = 125$ к Ом, $C = 5,2$ нФ, $L_1 = 4$ мГн, $L_2 = 8$ мГн;
4	Схема а: $r = 7,8$ Ом, $R_H = 140$ к Ом, $L = 7,7$ мГн, $C_1 = 3$ нФ, $C_2 = 7$ нФ;	4	Схема б: $r = 6,5$ Ом, $R_H = 175$ к Ом, $C = 6,7$ нФ, $L_1 = 6$ мГн, $L_2 = 3$ мГн;
5	Схема а: $r = 6,3$ Ом, $R_H = 160$ к Ом, $L = 4,3$ мГн, $C_1 = 6$ нФ, $C_2 = 2$ нФ;	5	Схема б: $r = 7,5$ Ом, $R_H = 200$ к Ом, $C = 9,3$ нФ, $L_1 = 2$ мГн, $L_2 = 4$ мГн;
6	Схема а: $r = 3,7$ Ом, $R_H = 330$ к Ом, $L = 7,3$ мГн, $C_1 = 9$ нФ, $C_2 = 3$ нФ;	6	Схема б: $r = 15$ Ом, $R_H = 75$ к Ом, $C = 29,4$ нФ, $L_1 = 7$ мГн, $L_2 = 2$ мГн;
7	Схема а: $r = 16,3$ Ом, $R_H = 520$ к Ом, $L = 4,3$ мГн, $C_1 = 16$ нФ, $C_2 = 8$ нФ;	7	Схема б: $r = 14$ Ом, $R_H = 200$ к Ом, $C = 9,3$ нФ, $L_1 = 6$ мГн, $L_2 = 9$ мГн;
8	Схема а: $r = 9,7$ Ом, $R_H = 340$ к Ом, $L = 9,3$ мГн, $C_1 = 3$ нФ, $C_2 = 12$ нФ;	8	Схема б: $r = 22$ Ом, $R_H = 400$ к Ом, $C = 5,8$ нФ, $L_1 = 2$ мГн, $L_2 = 10$ мГн;

5.5. Комп'ютерне завдання

1. У програмі Multisim зібрати схема для дослідження паралельного контуру першого виду згідно варіанту (рис. 5.3 а, прибрати/закоротити ємність C2), яку подано на рис. 5.4. Варіанти завдань представлені домашньому завданні. В якості генератора обрати функціональний генератора, в якому встановити режим гармонічних коливань та розраховано резонансну частоту та вхідну напругу 1 В.

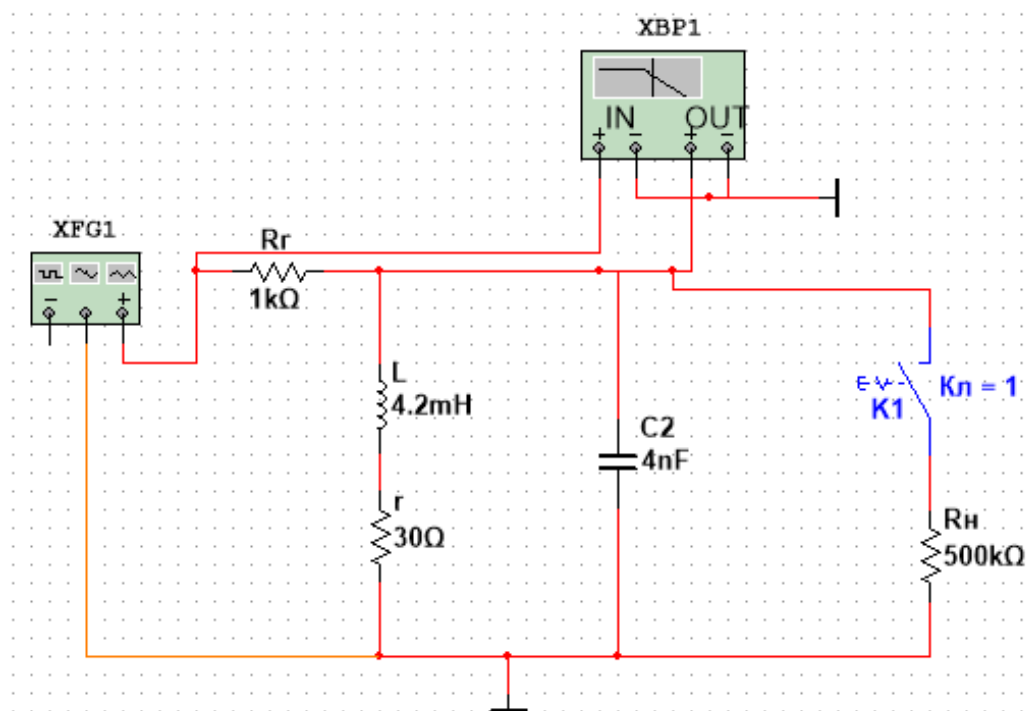


Рисунок 5.4 – Схема послідовного контуру в Multisim

У схемі ключ використовується, щоб перемкнути опір навантаження до всієї ємності або її частини. У цьому завданні за допомогою вимірювача АЧХ (Плотера Боде) зняти АЧХ та ФЧХ контуру від частоти для повного та часткового включення ємності у лінійному та логарифмічному масштабі. Порівняти отримані графіки із тими, що були отримані у домашньому завданні. За графіками виміряти смугу пропускання у лінійному та логарифмічному масштабі. Порівняти із розрахунковими. Данні занести у відповідну таблицю. Зробити висновок про те, як опір навантаження впливає на смугу пропускання при повному включенні до ємності контуру та частковому включенні до ємності C2.

Таблиця 5.1 – Результати вимірювання контуру першого виду

f_0 , кГц	Смуга пропускання, П, кГц			Добротність	
	Розраховане вдома	Виміряне лінійне	Виміряне, логарифмічне	Порахована вдома	Порахована на заняті
без Rн					
з Rн					

Для розрахунку добротності за вимірної смугою пропускання використовувати формулу

$$Q = \frac{f_0}{\Delta f}$$

Отримати частотні характеристики контуру можна за допомогою вимірювача АЧХ (рис. 4.5).

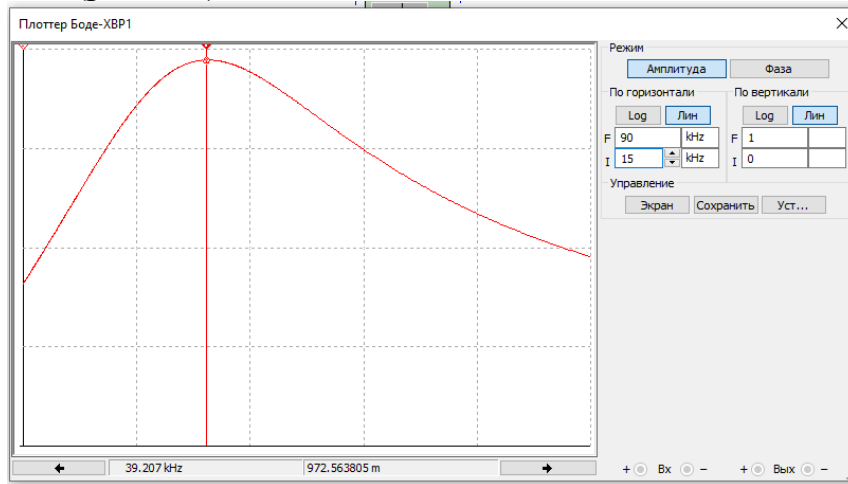


Рисунок 5.5 – Вікно налаштування частотних характеристик

2. У програмі Multisim зібрати схема для дослідження паралельного контуру другого виду згідно варіанту (рис. 5.6 а), яку подано на рис. 5.4. Варіанти завдань представлені у домашньому завданні. В якості генератор обрати функціональний генератора, в якому встановити режим гармонічних коливань та розраховано резонансну частоту та вхідну напругу 1 В.

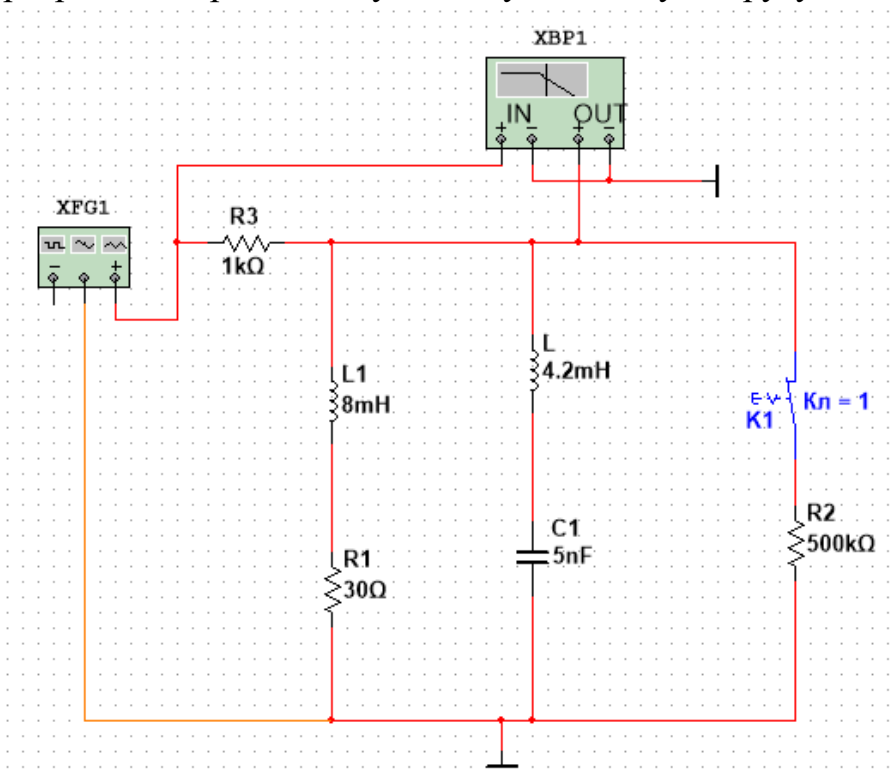


Рисунок 5.6 – Схема паралельного контуру другого виду в Multisim

У схемі ключ використовується, щоб підключати опір навантаження. У цьому завданні за допомогою вимірювача АЧХ (Плотера Боде) зняти АЧХ та ФЧХ контуру від частоти із врахуванням опору навантаження та без нього у лінійному та логарифмічному масштабі. Порівняти отримані графіки із тими, що були отримані у домашньому завданні. За графіками виміряти смугу пропускання у лінійному та логарифмічному масштабі. Порівняти із розрахунковими. Данні занести у відповідну таблицю. Зробити висновок про те, як опір навантаження впливає на смугу пропускання при повному включенні до ємності контуру та частковому включенні до ємності С2.

Отримати частотні характеристики контуру у діапазоні частот 0 до 100 кГц матимуть вигляд як показано на рис. допомогою вимірювача АЧХ (рис. 4.5).

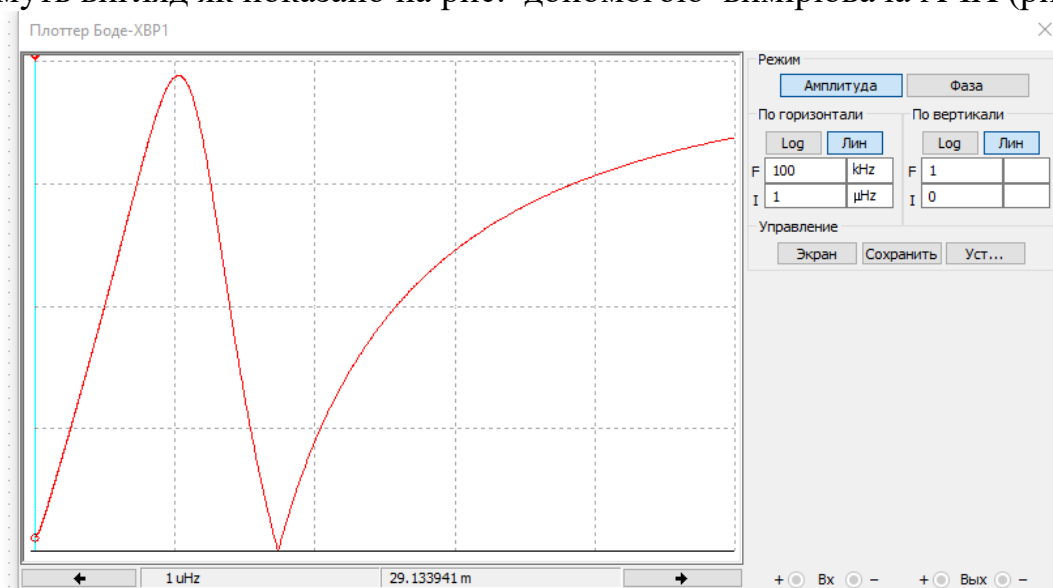


Рисунок 5.7 – АЧХ паралельного контуру другого виду в Multisim

Далі необхідно зменшити масштаб за частотою у такий спосіб, щоб відображалася лише перша частина графіку (рис. 5.8). За отриманим графіком визначити резонансну частоту, смугу пропускання та добротність контуру. Результати вимірювань занести до таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – Результати вимірювання контуру другого виду

f_0 , кГц	Смуга пропускання, П, кГц			Добротність	
	Розраховане вдома	Виміряне лінійне	Виміряне, логарифмічне	Порахована вдома	Порахована на заняті
без Rн					
з Rн					

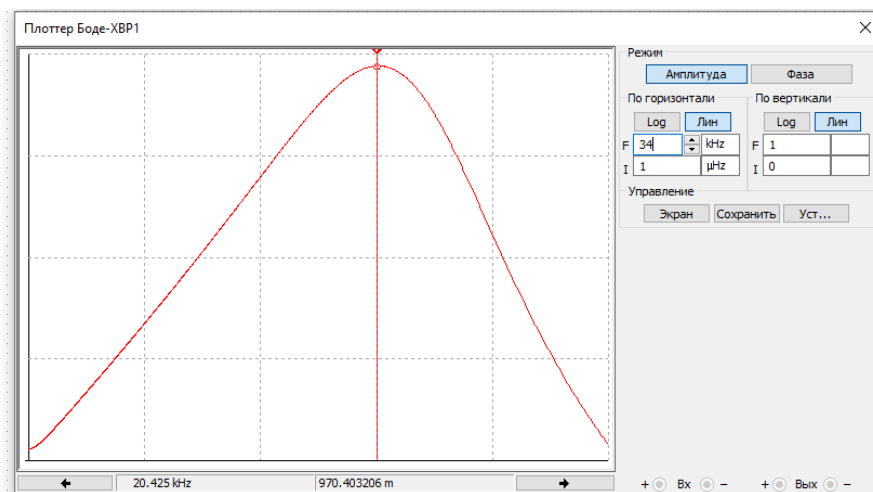


Рисунок 5.8 – АЧХ паралельного контуру другого виду у зменшеному діапазоні в Multisim

Підключити вольтметри для вимірювання коефіцієнта включення на резонансній частоті контуру. Результати вимірювань занести до таблиці 5.3.

Таблиця 5.3 – Результати вимірювання коефіцієнту включення контуру другого виду.

Коефіцієнт включення, p	Виміряне значення	Пораховане значення

Для розрахунку коефіцієнта включення паралельного контуру другого виду за виміряними напругами використовувати формулу

$$p = \frac{U_{L2}}{U_{ЗАГ}}$$

3. У програмі Multisim зібрати схема для дослідження паралельного контуру третього виду згідно варіанту, яку подано на рис. 5.9. Варіанти завдань представлені у домашньому завданні. Вимірювання зробити аналогічні до попереднього пункту.

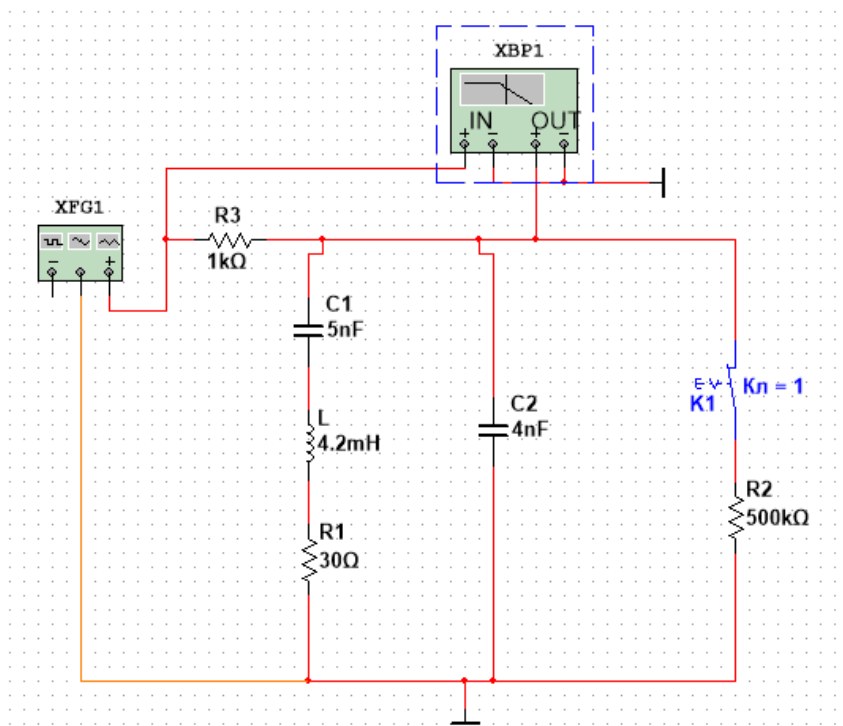


Рисунок 5.9 – Схема паралельного контуру третього виду в Multisim

Отримати частотні характеристики контуру у діапазоні частот 0 до 100 кГц матимуть вигляд як показано на рис. допомогою вимірювача АЧХ (рис. 5.10).

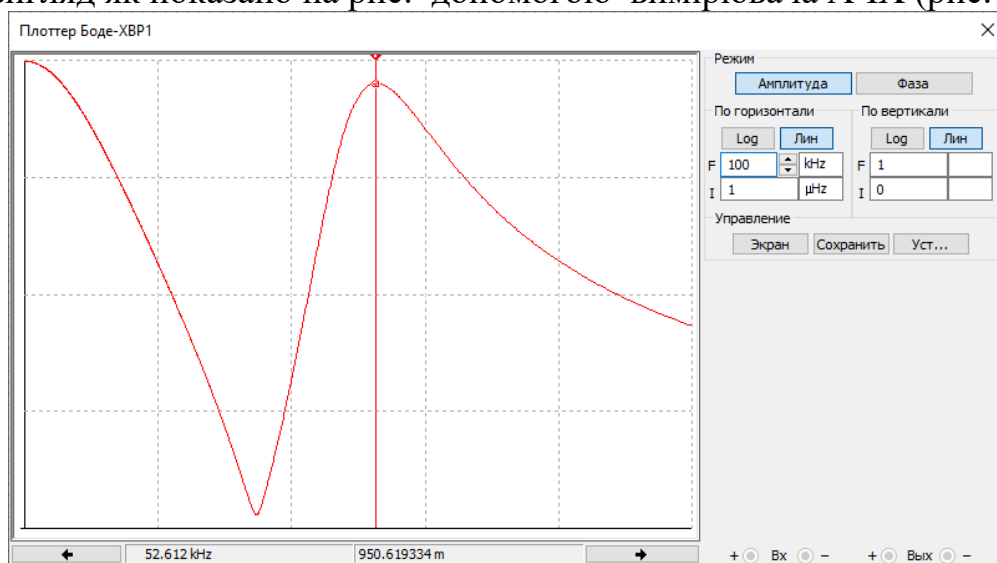


Рисунок 5.10 – АЧХ паралельного контуру другого виду в Multisim

Далі необхідно зменшити масштаб за частотою у такий спосіб, щоб відображалася лише перша частина графіку (рис. 5.11).

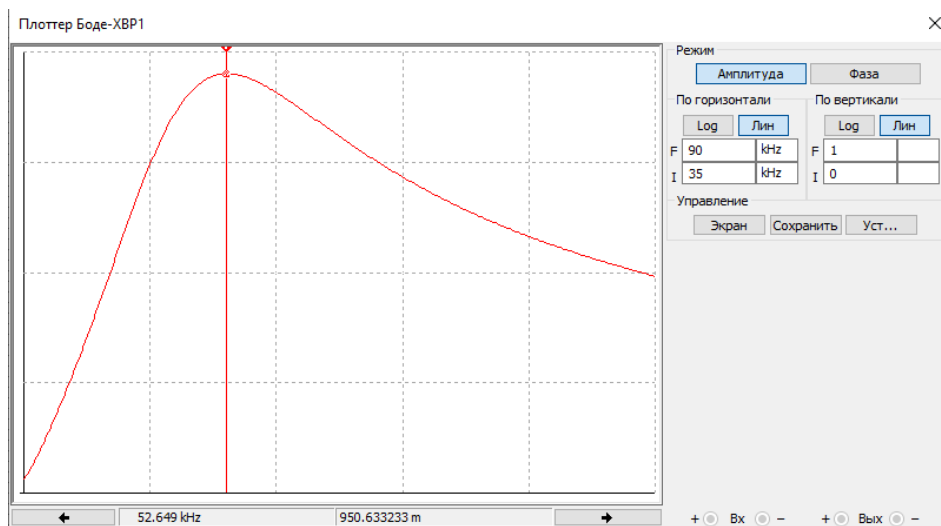


Рисунок 5.11 – АЧХ паралельного контуру третього виду у зменшеному діапазоні в Multisim

За отриманим графіком визначити резонансну частоту, смугу пропускання та добротність контуру. Результати вимірювань занести до таблиці 5.4.

Таблиця 5.4 – Результати вимірювання контуру третього виду

f_0 , кГц	Смуга пропускання, П, кГц			Добротність	
	Розраховане вдома	Виміряне лінійне	Виміряне, логарифмічне	Порахована вдома	Порахована на заняті
без Rн					
з Rн					

Підключити вольтметри для вимірювання коефіцієнта включення на резонансній частоті контуру. Результати вимірювань занести до таблиці 5.5.

Таблиця 5.5 – Результати вимірювання коефіцієнту включення контуру другого виду.

Коефіцієнт включення, p	Виміряне значення	Пораховане значення

Для розрахунку коефіцієнта включення паралельного контуру третього виду за виміряними напругами використовувати формулу

$$p = \frac{U_{L2}}{U_{3AG}}$$

5.6. Контрольні питання

1. Що таке вибірність або селективність?
2. Що таке паралельний коливальний контур?
3. Що таке резонанс струмів та резонанс напруг? В яких колах виникають?
4. Поняття про резонансу частоту та спосіб її обчислення.
5. Поняття про характеристичний опір та спосіб його обчислення.
6. Поняття про добротність послідовного та паралельного контуру та способи її обчислення.
7. Яка методика визначення резонансної частоти у паралельному контурі?
8. Поняття про смугу пропускання послідовного та паралельного контуру та способи її обчислення.
9. Як визначається вхідний опір послідовного та паралельного контурів?
10. Що розуміється під узагальненою розстройкою?
11. Як опір генератора внутрішньо впливає на добротність і смугу пропускання послідовного та паралельного контурів?
12. Як визначити добротність контуру за його фазовою характеристикою?
13. Намалюйте вхідні частотні характеристики послідовного та паралельного контурів?
14. Чи відповідає опір втрат в котушці індуктивності її опору, який виміряне на постійному струмі?
15. Властивості та області застосування контурів II та III виду.
16. Як визначаються коефіцієнти включення для контурів II та III виду?
17. Що розуміється під узагальненою розстройкою?
18. Як опір генератора внутрішньо впливає на добротність і смугу пропускання послідовного та паралельного контурів?
19. Як визначити добротність контуру за його фазовою характеристикою?
20. Намалюйте вхідні частотні характеристики послідовного та паралельного контурів?
21. Чи відповідає опір втрат в котушці індуктивності її опору, який виміряне на постійному струмі?
22. Властивості та області застосування контурів II та III виду.
23. Як визначаються коефіцієнти включення для контурів II та III виду?

6.Лабораторна робота №6. ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ В ЛІНІЙНИХ КОЛАХ

Мета роботи - експериментально визначити імпульсні характеристики лінійних електричних кіл та виконати дослідження проходження прямокутних імпульсів через RC – коло та коливальний контур.

Прилади та макети. Генератор імпульсів Г5-54; осцилограф типу С1-83; набірне поле; набір елементів: $L = 10$ мГ; $C = 100$ пФ, 1000 пФ, 10000 пФ; $R = 100$ Ом, 1 кОм, 10 кОм.

6.1.Опис роботи

Якщо на лінійне коло (рис 6.1) подати дію $x(t)$ у вигляді функції Дірака $\delta(t)$, то реакція $y(t)$ буде чисельно являти собою імпульсну характеристику $g(t)$.



Рисунок 6.1 – Структурна схема

З урахуванням розмірності діяння та реакції поняття імпульсної характеристики вводять таким чином[1]. Нехай $q(t) = Q_\delta \cdot \delta(t)$. Множник Q_δ - це ваговий коефіцієнт, що враховує вид діяння (струм чи напруга). Якщо вважати, що $\delta(t)$ має розмірність $[1/C]$, то ваговий коефіцієнт Q_δ повинен мати розмірність $[B \cdot C]$, або $[A \cdot C]$. Тому імпульсна характеристика $g(t)$ – це є не сама реакція, а відношення реакції $x(t)$ до вагового коефіцієнту Q_δ , тобто $g(t) = x(t)/Q_\delta$. Таке доповнення відповідно розмірності впливає із того, що реакцію кола $y(t)$ на будь-яке діяння $x(t)$ можна знаходити за допомогою згортки $x(t) * g(t)$:

$$y(t) = \int_0^t x(\tau) \cdot g(t - \tau) d\tau = \int_0^t x(t - \tau) \cdot g(\tau) d\tau.$$

Якби ми розмірність не обговорювали, то могли би, наприклад, отримати розмірність реакції $[B^2 \cdot C]$. Але на практиці для спрощення просто кажуть, що імпульсна характеристика – це реакція на функцію Дірака. По суті імпульсна характеристика являє собою вільний процес в колі – моментально збудили коло нескінченно вузьким імпульсом нескінченної амплітуди і одразу це діяння зникло. Якщо коло стійке, то воно повинно звернутися в початковий стан. У зв'язку з тим що по Лапласу, то $G(p) = \delta(p) \cdot K(p) = K(p)$, де $G(p)$ -зображення по Лапласу імпульсної характеристики $g(t)$, а $K(p)$ -операторна схемна функція. Отже, імпульсна характеристика може бути знайдена як обернене перетворення Лапласу від схемної функції: $g(t) = L^{-1}\{K(p)\}$. Оскільки функції Дірака “поки що” практично не існує, то для того, щоб отримати на екрані осцилографа імпульсну характеристику напруги, треба на вхід лінійного кола подати дуже короткий імпульс напруги з генератору

імпульсів. Причому форма цього короткого імпульсу практично на вигляд $g(t)$ не впливає. Головне, щоб спектр цього імпульсу практично був незмінний в межах АЧХ схемної функції. (Це справедливо тому, що спектром функції Дірака є стала величина, що дорівнює одиниці). Кількісно тривалість імпульсу можна визначити також із таких міркувань. Якщо схемна функція $K(p)$ не має кратних коренів знаменника (полісів), то вона може бути представлена у вигляді:

$$K(p) = \frac{F_1(p)}{F_2(p)} = \frac{A_1}{p - p_1} + \dots + \frac{A_i}{p - p_i} + \dots + \frac{A_m}{p - p_m},$$

що відповідає оригіналу імпульсної характеристики

$$g(t) = A_1 \cdot e^{p_1 t} + \dots + A_i \cdot e^{p_i t} + \dots + A_m \cdot e^{p_m t} \\ = A_1 \cdot e^{-t/\tau_1} + \dots + A_i \cdot e^{-t/\tau_i} + \dots + A_m \cdot e^{-t/\tau_m},$$

де p_1, p_2, \dots, p_m – полюси, $\tau_1 = -1/p_1, \tau_2 = -1/p_2, \dots, \tau_m = -1/p_m$ – величини, що мають розмірність часу і характеризують швидкість згасання кожної експоненти (практично можна вважати, що за три-чотири τ експонента згасне). Звідси очевидно, що тривалість імпульсу для отримання імпульсної характеристики повинна бути хоча би на порядок нижча, ніж саме мале τ_i в розкладі (1). Якщо полюси комплексні, то довжина імпульсу повинна бути на багато менше, ніж значення абсолютної величини оберненої дійсної частини кореня.

Перехідна характеристика $h(t)$, чисельно співпадає з реакцією кола на функцію Хевісайда $1(t)$. Розмірність $h(t)$ – відношення розмірності реакції до розмірності дії. Якщо треба експериментально визначити перехідну характеристику кола $h(t)$, то на його вхід подають прямокутний імпульс, тривалість якого перевищує час перехідних процесів в цьому колі. На протязі дії всього імпульсу ми доглядаємо на виході кола перехідну характеристику. Після закінчення імпульсу ми доглядаємо від'ємну $h(t)$. На підставі принципу суперпозиції можна стверджувати, що реакція кола на прямокутний імпульс знаходиться як сума реакцій на два стрибки, які відповідають передньому та задньому фронтам:

$$u(t) = h(t) \cdot 1(t) - h(t - \tau_i) \cdot 1(t - \tau_i).$$

де τ_i - тривалість вхідного імпульсу.

Спотворення прямокутного імпульсу колом оцінюють, використовуючи поняття тривалості фронту t_ϕ вихідного імпульсу та "сколювання" його вершини $\Delta U/U$ (рис. 6.2).

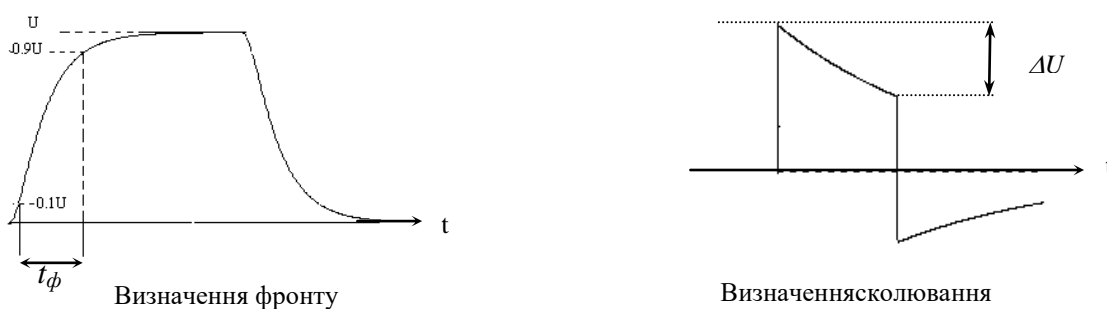


Рисунок 6.2 – Види спотворення прямокутного імпульсу напруги

Структурна схема експериментальної установки для визначення імпульсних характеристик кіл показана на рис. 6.3.

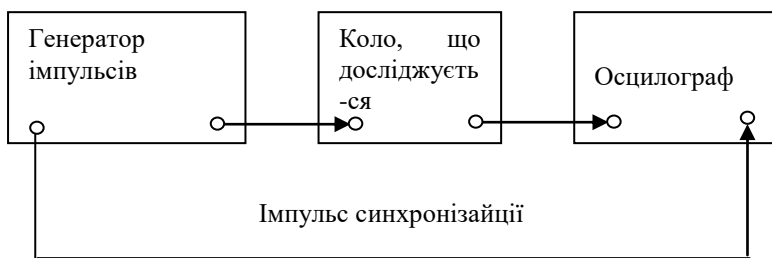


Рисунок 6.3 – Структурна схема експериментальної установки

Осцилограф в цьому випадку працює в "чекаючому режимі" та запускається синхронізуючим імпульсом генератора імпульсів. Досліджуване коло складається на набірному полі. Часові інтервали вимірюють за допомогою осцилографа. Використовуючи поділки шкали, вимірюють горизонтальну відстань між двома точками, інтервал часу між якими необхідно знайти. При цьому вимірювану ділянку необхідно за допомогою ручки переміщення зображення в горизонтальному напрямку установити в середню частину шкали по змозі симетрично центру екрану. Щоб зменшити похибку вимірювання за рахунок товщини ліній, вимірюють чи за правими чи за лівими краями ліній зображення. Вимірювану за шкалою відстань в сантиметрах треба помножити на цифри значення індексу установленної тривалості розгортки на сантиметр, а потім на покази перемикача "МНОЖНИК".

6.2. Домашнє завдання

1. Отримати аналітичні вирази та побудувати імпульсні характеристики кіл, зображених на рис. 6.4, за такими даними: $C=1000$ пФ; $R=10$ кОм; $L=10$ мГн.

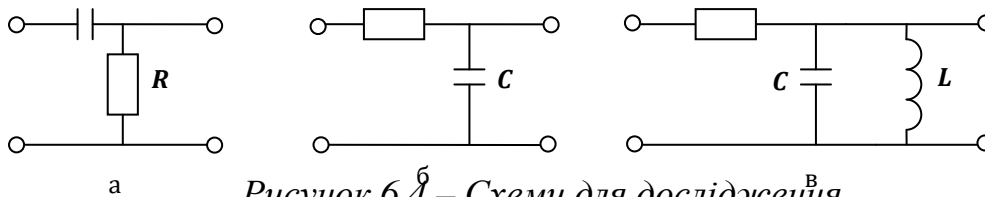


Рисунок 6.4 – Схеми для дослідження

Визначити, яка тривалість вхідного імпульсу потрібна, щоб вихідна напруга практично співпадала з імпульсною характеристикою кола.

- для кола 4а $\tau_i \leq$ _____
- для кола 4б $\tau_i \leq$ _____
- для кола 4в $\tau_i \leq$ _____

2. Розрахувати параметри кола (рис. 6.4,а) так, щоб "сколювання" вершини прямокутного імпульсу тривалістю 10 мкс не перевищувало 10%.

$\tau_k =$ _____ мкс, $R =$ _____ кОм, $C =$ _____ пФ.

3. Розрахувати параметри кола (рис. 5.4,б) так, щоб тривалість фронту

прямокутного імпульса з $\tau_i=10$ мкс не перевищувала 1 мкс.

$$\tau_k = \underline{\hspace{2cm}} \text{ мкс}, \quad R = \underline{\hspace{2cm}} \text{ кОм}, \quad C = \underline{\hspace{2cm}} \text{ пФ}.$$

4. Отримати аналітичні вирази та побудувати реакції кола (рис. 6.4в) на прямокутний імпульс тривалістю 3 та 10 мкс.

6.3. Лабораторне завдання

1. Скласти стенд для експериментального дослідження імпульсних характеристик (рис. 6.5). Установити тривалість імпульсу генератора, яка б забезпечила спостереження імпульсних характеристик кіл.

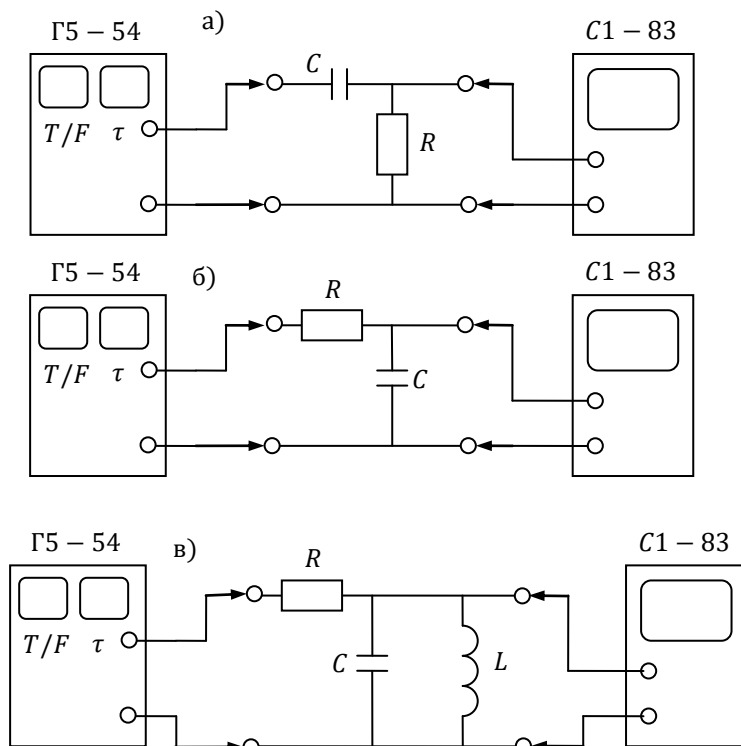


Рисунок 6.5 – Варіанти підключення осцилографу

- По черзі скласти кола (рис. 6.5), замалювати з екрану осцилографа їх імпульсні характеристики. Часові інтервали на осі часу відраховувати за допомогою осцилографа в положенні "калібр" ручки "тривалість плавно". Одержані експериментальні графіки відобразити на відповідних розрахункових теоретичних графіках.
- Установити тривалість імпульсу 10 мкс та, складаючи по черзі кола (рис. 5.5,а та 5.5,б), замалювати форму вихідного сигналу.
- Скласти кола (рис. 6.5,а,б), обравши R та C у відповідності з результатом розрахунку домашнього завдання (п.п. 2 та 3). Замалювати форму вихідного сигналу, порівнявши з розрахунковою.
- Експериментально визначати реакцію кола (рис. 6.5,в) на прямокутний імпульс тривалістю 3 та 10 мкс. Порівняти результати з розрахунком.
- Простежити за зміною форми вихідного сигналу, якщо змінюються параметри кожного з кіл (рис. 6.5) в широких межах, використовуючи такі

номінальні значення : $R = 100 \text{ Ом}, 1 \text{ кОм}, 10 \text{ ком}; C = 100 \text{ пФ}, 1000 \text{ пФ}, 10 \text{ нФ}.$

6.4.Комп'ютерне завдання

Данні для дослідження взяти згідно номеру бригади

Таблиця 6.1 – Варіанти завдань для експериментального дослідження

Номер бригади	Параметри елементів схеми	
	Рд,кОм	Сд, нФ
1	10	1
2	12	2
3	16	3
4	18	4
5	20	5
6	8	6
7	6	7
8	4	8
9	2	9
10	1	10

1. Скласти схему для експериментального дослідження реакції кола на дію прямокутних імпульсів напруги кола (рис. 6.6). Установити тривалість імпульсу генератора, яка забезпечила б спостереження не більше двох періодів слідування прямокутних імпульсів вхідної та вихідної напруги, яка б відображалася на екрані осцилографа оптимально.

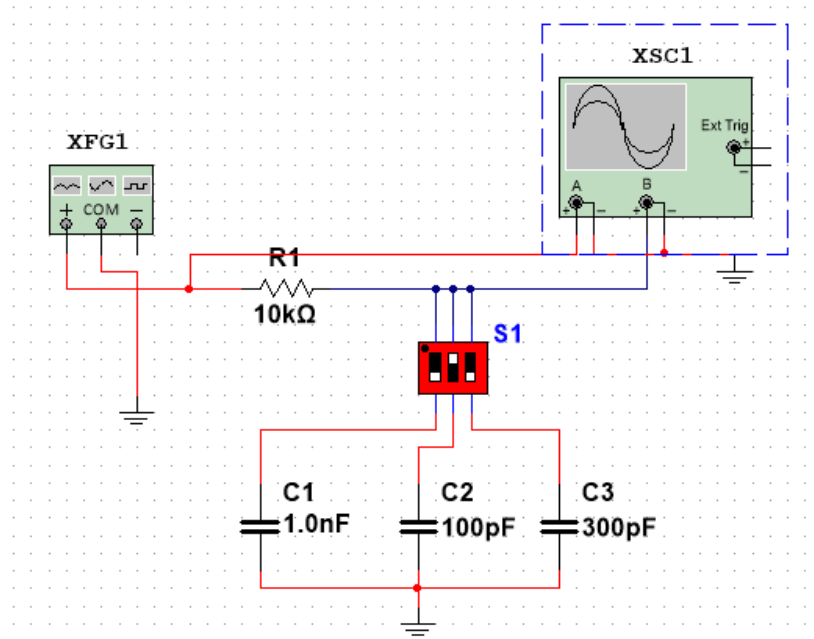


Рисунок 6.6 – Схема для дослідження RC-кола

Дослідити осцилограми напруг для різних значень ємності: $C1=1\text{нФ}, C2=300\text{пФ}, C3=100\text{пФ}$ при $R = 10 \text{ кОм}$. Задати частоту генератора 10 кГц та

амплітуду тривалості прямокутних імпульсів 10 В. Визначити, при якому значенні ємності напруга на виході буде найкраще наближеною до прямокутної форми вхідної напруги. Навести цю осцилограму. Також навести ще дві осцилограми для найгіршого та посереднього випадку Для кожного випадку розрахувати сталу часу кола формулою $\tau = R \cdot C$.

Для випадку найкращого значення ємності, для якого напруга на виході буде більше наближена до прямокутної форми, дослідити, як зміниться осцилограма напруга при збільшенні та зменшенні опору в 10 раз. Навести скрін осцилограми та розрахувати сталу часу кола. Зробити висновки про те, як впливає зміни величини опору та ємності на те, щоб імпульс напруги на виході був якнайкраще наближений до прямокутної форми.

Результати розрахунку сталу часу кола звести до таблиці 6.2

Таблиця 6.2. Стала часу кола

Схема	Оптимальний випадок	Найгірший випадок	Середній випадок	При збільшенні R в 10 разів	При зменшенні R в 10 разів
CR (4, а)					
RC (4, б)					

Отримати на екрані осцилографа імпульсну характеристику та навести її скрін. Параметри кола взяти такі, як у домашньому завданні.

2. Скласти схему для експериментального дослідження вхідної та вихідної напруги кола (рис. 6.7). Установити тривалість імпульсу генератора, яка забезпечила б спостереження не більше двох періодів слідування прямокутних імпульсів вхідної та вихідної напруги, яка б відображалася на екрані осцилографа оптимально.

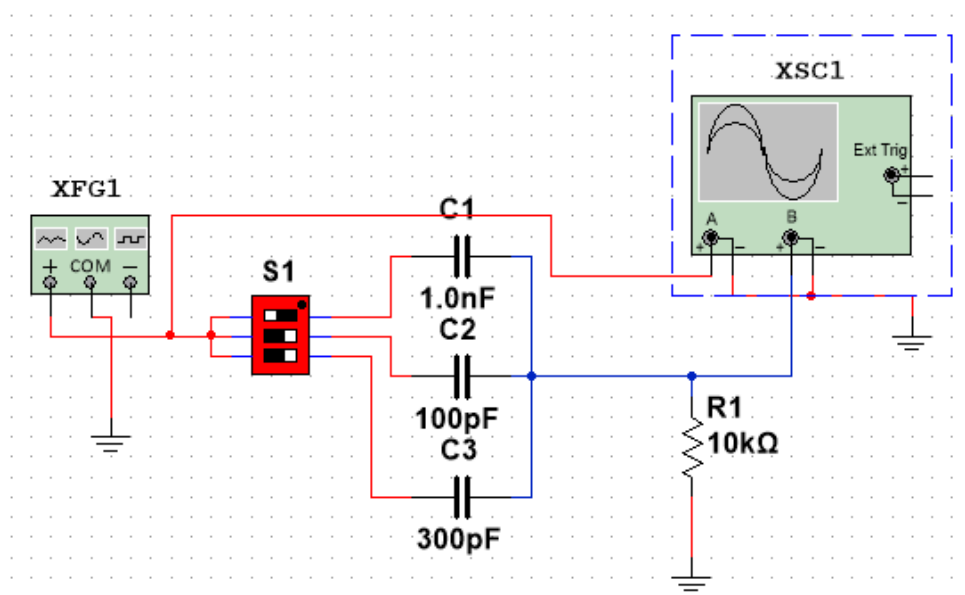


Рисунок 6.7 – Схема для дослідження CR-кола

Повторити все, що було написано для пункту 1.

3. Скласти схему для експериментального дослідження реакції кола на послідовність прямокутних імпульсів напруги кола (рис. 6.8). Установити тривалість імпульсу генератора, яка забезпечила б спостереження імпульсних характеристик кіл та установити тривалість імпульсу генератора, яка забезпечила б спостереження не більше одного періоду слідування прямокутних імпульсів вхідної та вихідної напруги, яка б відображалася на екрані осцилографа оптимально.

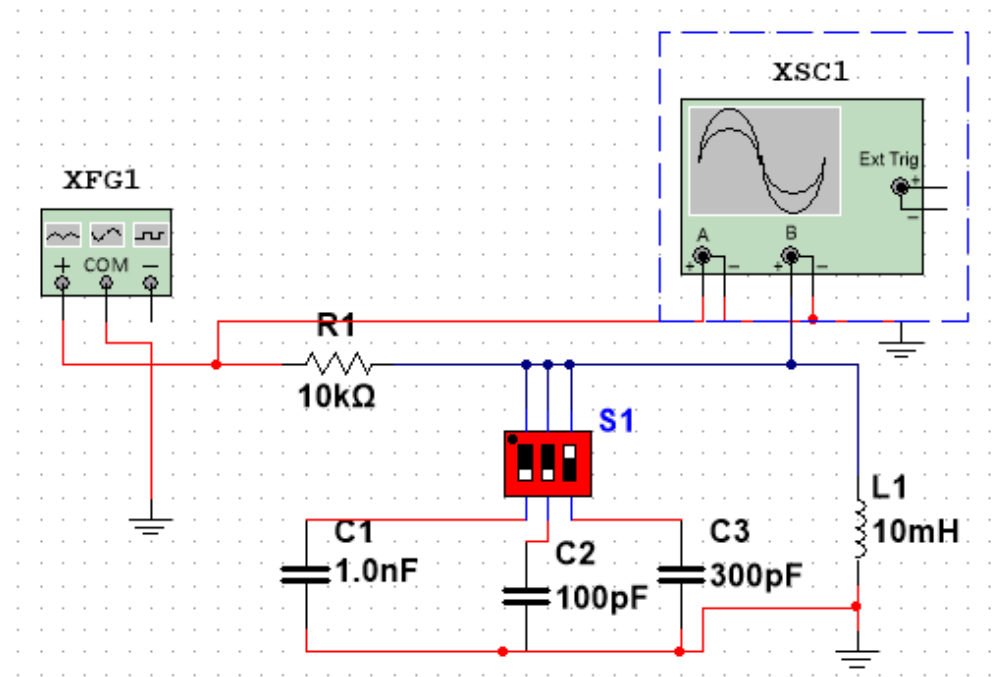


Рисунок 6.8 – Схема для дослідження контуру

Навести осцилограми напруг для різних значень реакція кола на прямокутний імпульс тривалістю 3 та 10 мкс. Для цього у властивостях генератора у полі «Duty cycle» задати 3% та 10% при частоті 10 кГц.

При цьому

$$T = \frac{1}{F} = \frac{1}{10 \cdot 10^3} = 0.1 \cdot 10^{-3} = 100 \cdot 10^{-6} = 100 \text{ мкс.}$$

Тоді шпарованість визначається

$$\theta = \frac{t}{T},$$

де t – тривалість прмокутного імпульсу.

Порівняти результати із пунктом 4 домашнього завдання. Зробити висновки про форму сигналів. Зробити висновки чи співпала форма сигналів із тою, що була отримана у домашньому завданні.

Дослідити, як впливає зміна ємності: $C1=1\text{nF}$, $C2=300\text{пФ}$, $C3=100\text{пФ}$ при $R = 10 \text{ кОм}$. Визначити, при якому значенні ємності напруга на виході буде найкраще наближеною до гармонічної форми вхідної напруги. Навести осцилограму для цього випадку.

Для випадку найкращого значення ємності, для якого напруга на виході буде більше наближена до гармонічної форми, дослідити, як зміниться осцилограма напруга при збільшенні та зменшенні опору в 10 раз. Навести скріни осцилограм. Зробити висновки про те, як впливають зміна величини опору та ємності на те, щоб імпульс напруги на виході був якнайкраще наближений до гармонічної форми.

4. Підключити Плоттер Боде та дослідити частотні характеристики коефіцієнта передачі за напругою (навести частотні характеристики для додаткових параметрів, що підключити послідовно та паралельно до опора ($R_2=R_3=R_d$) та досліджуваної ємності $C_4=C_5=C_d$) кіл (рис. 6.4 а, б). Навести виміряні характеристики Амплітуди (по осі частот обрати лінійний масштаб до 200 кГц, по амплітуді логарифмічний) та фази (по осі частот обрати лінійний масштаб до 200 кГц, по амплітуді лінійний в градусах) від частоти у зручному масштабі, щоб АЧХ та ФЧХ відображалось оптимально на весь екран осцилографа.

Результати розрахунку сталу часу кола звести до таблиці

Схема	Оптимальний випадок	При послідовному додаванні R_d	При паралельному додаванні R_d	При послідовному додаванні C_d	При послідовному додаванні C_d
CR (4, а)					
RC (4, б)					

Зробити висновки про те, як змінився графік АЧХ по горизонтальній та вертикальній осі у порівнянні із оптимальним.

Приклад підключення додаткових опорів R_2, R_3 та додаткових ємностей C_4, C_5 (рис. 6.4 а) поданий нижче на рис. 6.9, а для схеми (рис. 6.4 б) змодельовати схеми самостійно.

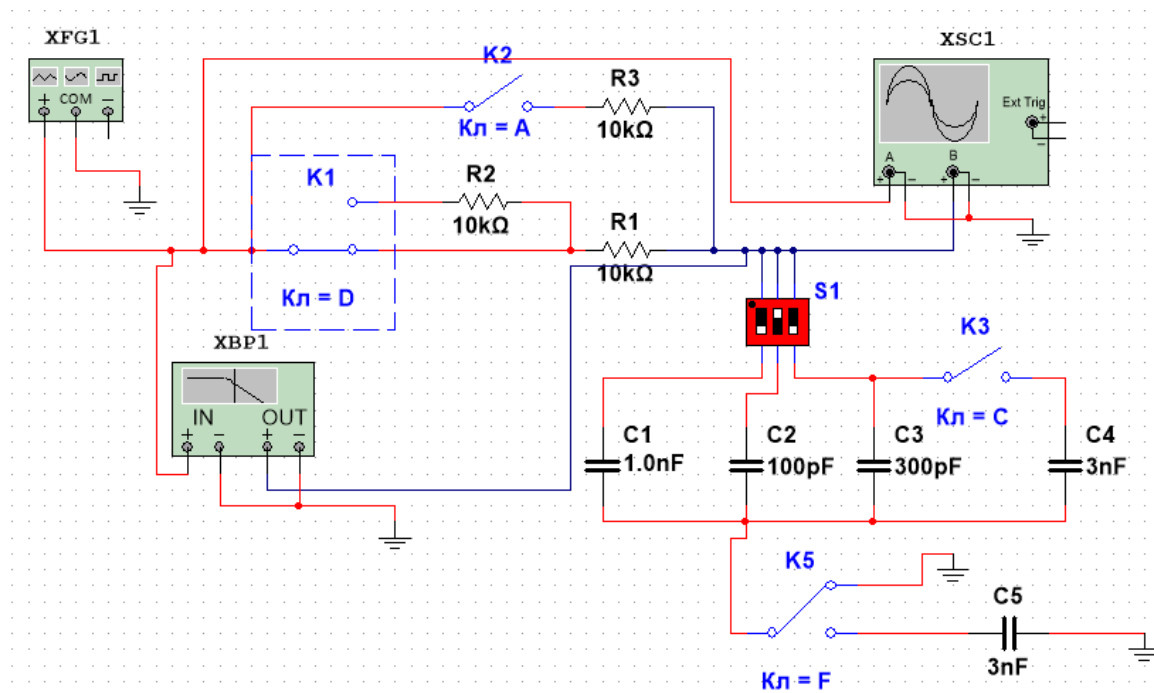


Рисунок 6.9 – Схема для дослідження

6.5. Контрольні питання

1. Що таке функція Хевісайда та функція Дірака. Які властивості цих функцій?
2. Що розуміють під імпульсною та перехідною характеристиками кола?
3. Що таке перехідний процес? Що таке комутація?
4. Сформулювати перший та другий закони комутації.
5. Які наслідки із законів комутації?
6. Що таке стала часу кола для послідовного з'єднання ємності та опору?
7. За яких умов реакція кола на прямокутний імпульс відповідає імпульсній характеристиці?
8. Які спотворення зазнає прямокутний імпульс при проходженні через RC - кола?
9. Як пов'язані спотворення прямокутного імпульсу з параметрами RC - кола?
10. Як розрахувати перехідну та імпульсну характеристики класичним методом?
11. Як розрахувати перехідну та імпульсну характеристики операторним методом?
12. В чому полягає метод інтегралу накладання (метод інтегралу Дюамеля)?
13. Як від зображення функції за Лапласом перейти до часового оригіналу?

7. Лабораторна робота № 7. КОЛА З РОЗПОДІЛЕНИМИ ПАРАМЕТРАМИ

Мета роботи: вивчити різні режими роботи довгої лінії.

Прилади та макети: Двопровідна повітряна лінія з генератором живлення; індикаторний пристрій та навантаження; резонансний вольтметр і котушка зв'язку; генератор типу Г4-18А; вольтметр ВЗ-2А.

7.1. Опис роботи

Об'єктом дослідження є двопровідна лінія. Живлення лінії здійснюється від генератора метрового діапазону (рис. 7.1).

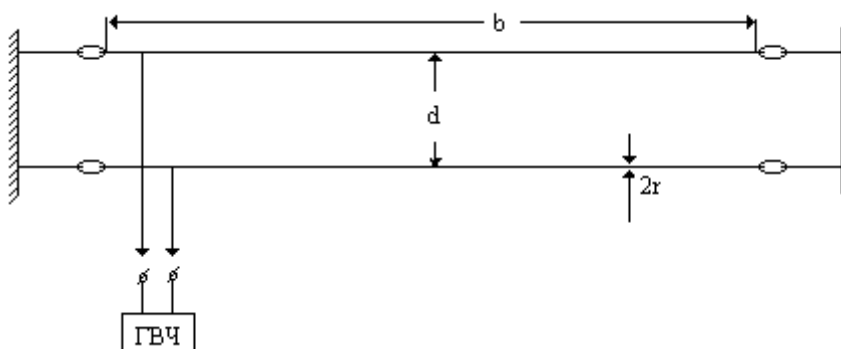


Рисунок 7.1 – Вигляд двопровідної повітряної лінії

Для зняття залежностей розподілу амплітуд наруги уздовж лінії використовується індикаторний пристрій, що складається із симетричного вібратора і кристалічного детектору з мікроамперметром магнітоелектричної системи. Індикаторний пристрій змонтовано на каретці, яку можна переміщувати уздовж лінії. Відстань відлічують за поділами масштабної лінійки, яка теж може переміщуватися уздовж лінії.

При обробці результатів вимірів треба мати на увазі, що в лінії вимірюються не абсолютні значення напруг, а лише пропорційні їм значення. Крім того, оскільки напівпровідниковий детектор, що використовується в індикаторі, практично має квадратичну вольт-амперну характеристику, то для отримання істинної картини розподілу напруги уздовж лінії треба із показників прибору індикатору необхідно добувати квадратний корінь.

Кола із розподіленими параметрами на відміну від кіл із зосередженими параметрами, характеризуються хвильовими процесами, при цьому величини, що їх описують у загальному випадку є функціями часу та просторових координат

$$u_{\text{ПАД}}(t, x) = U_{\text{ПАД1}} e^{-\alpha x} \cos(\omega t + \theta - \beta x);$$

$$u_{\text{ВІД}}(t, x) = U_{\text{ПАД1}} e^{\alpha x} \cos(\omega t + \theta + \beta x).$$

Одним із прикладів кіл із розподіленими параметрами є довгі лінії.

Довгими лініями називають такі лінії, геометричні розміри яких більше робочої довжини хвилі електромагнітних коливань або спів розмірні з нею.

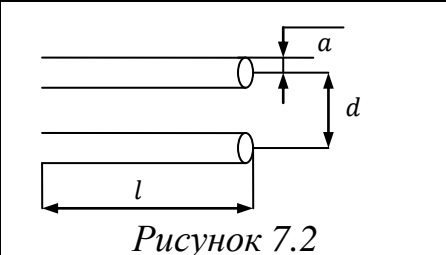
У довгих лініях необхідно враховувати електричні процеси за допомогою яких електрична енергія чи сигнали передаються на відстань, оскільки електричні та магнітні поля розподілені вздовж всієї довжини лінії та перетворення електромагнітної енергії у тепло також відбувається по всій довжині лінії.

Із такої точки зору напруги та струми на різних ділянках навіть нерозгалуженого кола відрізняються одне від одного, тобто є функціями двох незалежних змінних: часу t та просторової координати x . Такі кола називаються колами із розподіленими параметрами. Зміст такої назви полягає у тому, що у кіл даного класу кожен нескінченно малий елемент їх довжини характеризується опором, індуктивністю, а між проводами – ємністю та провідністю.

7.2. Домашнє завдання

1. Розрахувати по геометричним розмірам лінії, що виконана із мідних дротів, розташованих у повітрі, хвильовий опір та статичну ємність.

Таблиця 7.1. Геометричні розміри

	Геометричні розміри	
	$d = \underline{\hspace{2cm}}$	$a = \underline{\hspace{2cm}}$
	Хвильовий опір	Статична ємність
	$Z_{ХВ} = 276 \cdot \lg\left(\frac{d}{a}\right)$	$C_0 \approx \frac{12.07}{\lg\left(\frac{d}{a}\right)} \cdot 10^{-12} \left[\frac{\Phi}{М}\right]$

2. Обміркувати методику експериментального визначення статичної ємності лінії резонансним методом (компенсаційним).

7.3. Лабораторне завдання

1. За геометричними розмірами лінії розрахувати хвильовий опір і статичну ємність лінії.

$Z_{ХВ} = \underline{\hspace{2cm}}$ Ом. $C_{ТЕОРЕТИЧНЕ} = \underline{\hspace{2cm}}$ пФ.

2. Виміряти статичну ємність лінії за допомогою схеми заміщення на рис. 5.3. Вимір провести на частоті, для якої $\lambda \gg b$ (b -довжина лінії). Порівняти експериментальне і теоретичне значення цієї ємності (рис. 7.3).

$C_{ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ} = \underline{\hspace{2cm}}$ пФ

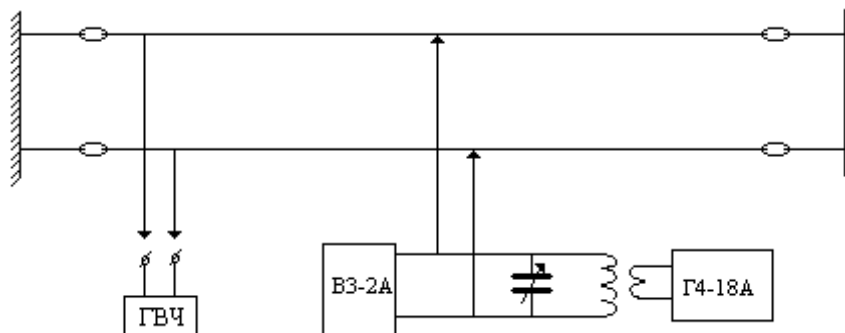


Рисунок 7.3 – Схема для вимірювання погонної ємності

Спочатку підключаємо клеми контуру до третього проводу, нитки. Потім перевіряємо, щоб десяті значення показів контуру не були на границі, десь були в районі 5-10. Далі по відхиленню стрілки вольтметра настраюємо контур в резонанс, підключивши на вхід генератор Г4-18А. Перемикаючи ручку діапазонів генератора, шукаємо резонансу частоту в III або IV діапазонах (рис. 6.4). Високочастотний генератор біля вікна має бути виключений.

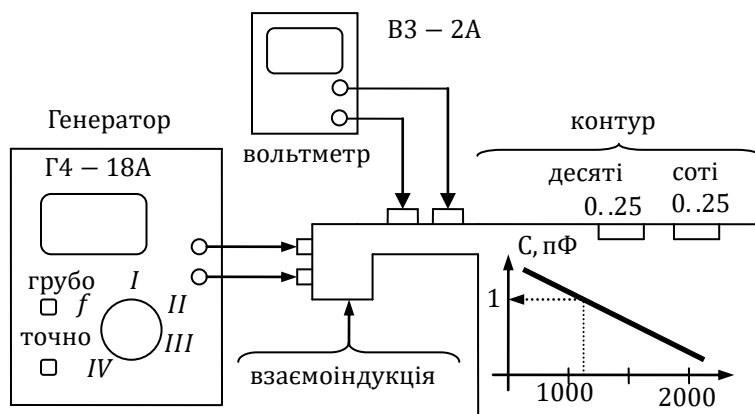


Рисунок 7.4 – Схема підключення контуру

Якщо десяті значення приймають 10, то ще на графіку відповідає значенню 1000, тобто цифра помножається на 100. Точка 1 на графіку буде відповідати величини ємності C_1 .

Після налаштування контуру в резонанс необхідно клеми контуру підключити до двопровідної повітряної лінії, ввімкнути високочастотний генератор, що розташований на початку лінії. Далі без різких рухів, щоб не збурювати середовище та з ввімкненим мобільним телефоном здійснювати подальші виміри. Після підключення, контур розстроюється, оскільки ми в лінію внесли статистичну ємність, тобто ємність між проводами. Тепер необхідно контур настроїти в резонанс, використовуючи ручку на контуру (спостерігаємо, зміни показань: десяті та соті), не змінюючи частоту генератора. Резонанс аналогічно контролювати за вольтметром (рис. 7.5).

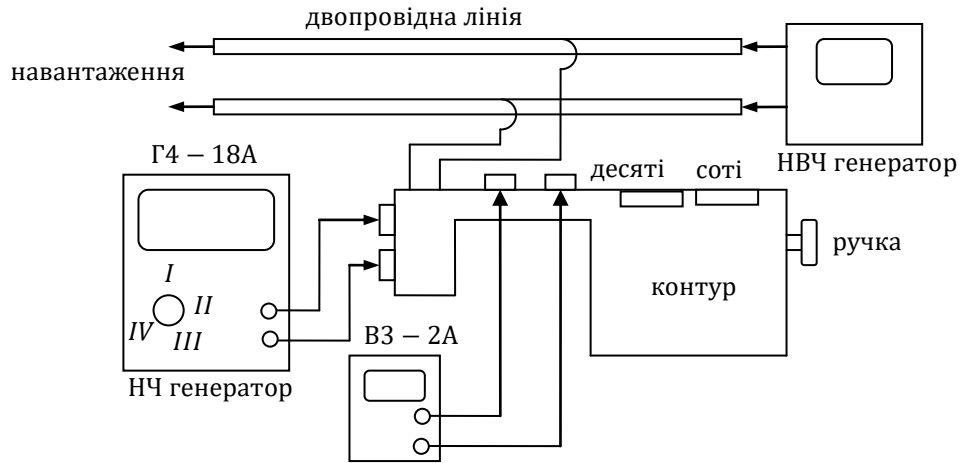


Рисунок 7.5 – Схема підключення контуру до дворовідної повітряної лінії

Далі по графіку на контурі визначаємо ємність C_2 , а далі компенсаційним методом визначаємо статистичну ємність (рис. 7.6).

$$C_{\text{Статична}} = C_1 - C_2 \text{ [пФ]}.$$

Визначимо погонну ємність

$$C_0 = \frac{C_{\text{Статична}}}{l}.$$

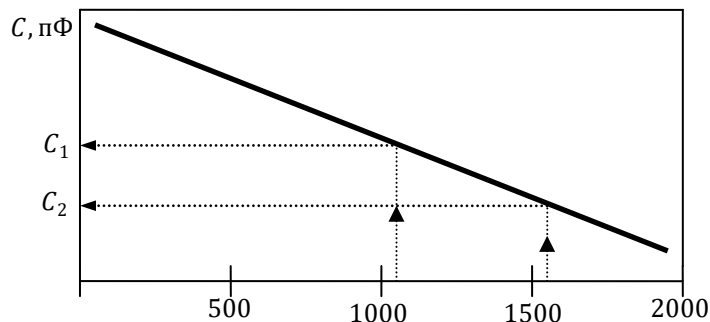


Рисунок 7.6 – Визначення статистичної ємності

3. Визначити довжину хвилі, що поширюється уздовж лінії

$$\lambda = \underline{\hspace{2cm}} \text{ м.}$$

Довжину хвилі визначити за допомогою квадратичного детектора та лінійки, вимірявши відстань між двома сусідніми мінімумами у лінії (рис. 7.7).

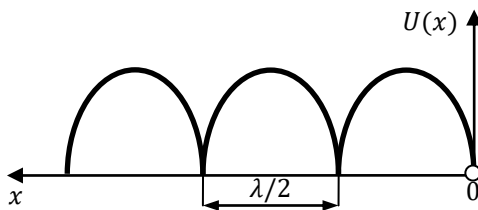


Рисунок 7.7 – Вигляд розподілу напруги від кінця лінії без втрат

4. Для дослідження хвильових процесів у лінії в стаціонарному гармонічному режимі зняти і побудувати графіки залежності розподілу амплітуд напруг уздовж лінії для наступних навантажень:

- а) розімкненої лінії (рис. 7.8 а);
- б) коротко замкнутої лінії (рис. 7.8 б);
- в) лінії, що навантажена на комплексний опір (рис. 7.8 в).

Розподіл амплітуд напруг уздовж лінії для різних режимів роботи лінії знімати у напрямку від навантаження до генератора на довжині 1...1,5 хвиль.

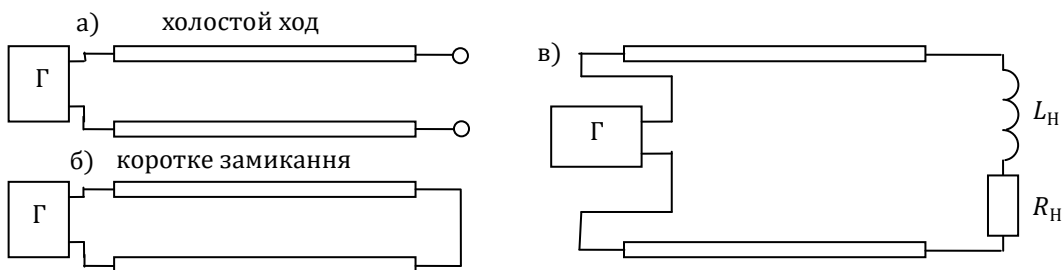


Рисунок 7.8 – Опори навантаження лінії: холостий хід (а), коротке замикання (б), активно-індуктивне навантаження (в)

5. За графіком, який отримано в п.4-в, визначити коефіцієнт бігучої хвилі для комплексного опору навантаження і пояснити отримані результати.

КБХ= _____.

7.3. Контрольні питання

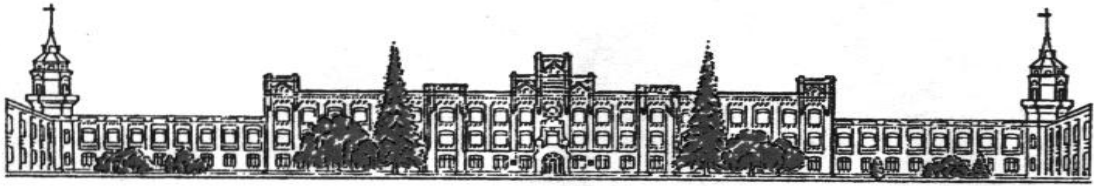
1. Яке електричне коло називається довгою лінією? Які типи її конструкції ви знаєте?
2. Які первинні і другорядні параметри лінії вам відомі? Їх фізичний зміст.
3. Телеграфні рівняння та їх рішення для гармонічного струму.
4. За яких умов і чому в лінії виникають режими бігучих, стоячих і змішаних хвиль?
5. Який вираз мають рівняння бігучої та стоячої хвилі?
6. Який вигляд мають графіки вхідного опору (модуля, активної, реактивної складових) ідеальної лінії для різних навантажень (узгоджене навантаження, коротке замикання, холостий хід, активне навантаження, що не дорівнює $Z_{ХВ}$)?
7. Який вигляд мають графіки розподілу амплітуд напруг уздовж лінії для режимів бігучої, стоячої і змішаної хвилі?
8. Як чисельно оцінити ступінь узгодження лінії із навантаженням?
9. Як експериментально визначити довжину хвилі, коефіцієнт стоячої хвилі?
10. Що таке коефіцієнт відбиття? Чому він дорівнює для різних режимів роботи лінії?
11. Що таке коефіцієнт бігучої хвилі? Як його визначити через коефіцієнт відбиття?

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни «Основи теорії кіл» для студентів радіотехнічного факультету спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка / Укладачі: М. І. Ястребов, А.В. Булашенко. – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. – 29с.
2. Основи теорії кіл: Підручник для вищих навчальних закладів. Ч.1 / Ю. А. Коваль, Л. В. Гринченко, І.О. Милютченко, О. І. Рибін / за заг. ред. В.М. Шокола, В. І. Правди. – Харків: Компанія СМІТ, 2008 – 432с.
3. Основи теорії кіл: Підручник для вищих навчальних закладів. Ч.2 / Ю. А. Коваль, Л. В. Гринченко, І.О. Милютченко, О. І. Рибін / за заг. ред. В.М. Шокола, В. І. Правди. – Харків: Компанія СМІТ, 2008 – 560с.
4. Основи теорії та комп'ютерне моделювання електронних кіл: навчальний посібник [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студентів спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка / В. Д. Сташук, А.В. Булашенко; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл 6.58 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 400с.
5. Основи теорії кіл: курс лекцій [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студентів спеціальності 172 Електронні комунікації та радіотехніка / А. В. Булашенко; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл 6.26 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 385с.
6. Основи теорії кіл. Посібник до виконання розрахунково-графічної роботи. [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студентів спеціальності 172 Електронні комунікації та радіотехніка / А. В. Булашенко; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл 1.87 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 60с.
7. Основи теорії кіл. Розрахунок лінійних електричних кіл постійного струму. Практикум. [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студентів спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка / А. В. Булашенко, М.І. Ястребов; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл 1.62 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 65с.
8. Основи теорії кіл. Розрахунок лінійних електричних кіл змінного струму. Практикум. [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студентів спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка / А. В. Булашенко; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл 1.31 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 52с.
9. Теоретичні основи електротехніки: підручник: у 3 т. / за заг. ред. І. М. Чиженка, В. С. Бойко. - К.: ІВЦ «Видавництво «Політехніка», 2004. - Т. 1.: Усталений режим лінійних електричних кіл із зосередженими параметрами. – 272с.
10. Основи теорії кіл. Розрахунок довгих ліній. Практикум. [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студентів спеціальності 172 Електронні комунікації та радіотехніка / А. В. Булашенко; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл 1.4 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 44с.

11. Основи теорії кіл. Розрахунок поодиноких контурів. Практикум. [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студентів спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка / А. В. Булашенко; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл 1.37 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 52с.
12. Основи теорії кіл. Розрахунок схемних функцій, чотиріполосників та операторний метод у простих колах. Практикум. [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студентів спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка / А. В. Булашенко; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл 1.72 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 68с.
13. Гумен М.Б. Основи теорії електричних кіл. У 3 кн. Кн. 1. Аналіз лінійних електричних кіл. Часова область: Підручник. / М.Б. Гумен, А.М. Гуржій, В.М. Співак; За ред. М.Б. Гумена. – К.: Вища шк., 2003. – 399с.
14. Гумен М.Б. Основи теорії електричних кіл. У 3 кн. Кн. 2. Аналіз лінійних електричних кіл. Частотна область: Підручник. / М.Б. Гумен, А.М. Гуржій, В.М. Співак; За ред. М.Б. Гумена. – К.: Вища шк., 2004. – 358с.
15. Теоретичні основи електротехніки: підручник: у 3 т. / за заг. ред. І. М. Чиженка, В. С. Бойко. - К.: ІВЦ «Видавництво «Політехніка», 2004. - Т. 1.: Усталений режим лінійних електричних кіл із зосередженими параметрами. – 272с.
16. Теоретичні основи електротехніки: підручник: у 3 т. / за заг. ред. І. М. Чиженка, В. С. Бойко. - К.: ІВЦ «Видавництво «Політехніка», 2008. - Т. 2. Перехідні процеси у лінійних електричних колах, нелінійні електричні та магнітні кола. – 224с.
17. Трембач Р.Б. Теорія електричних та магнітних кіл. [Текст] Навчальний посібник/ Р.Б. Трембач – Тернопіль: ТНЕУ, 2015 – 263с.

Додаток А. Зразок титульного аркуша до лабораторної роботи



Міністерство освіти і науки України
 Національний технічний університет України
 «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
 Радіотехнічний факультет
 Кафедра радіоінженерії

ЗВІТ ПРО ЛАБОРАТОРНУ РОБОТУ № ____
« _____ »

з дисципліни **“ОСНОВИ ТЕОРІЇ КІЛ”**

БРИГАДА № ____

ВИКЛАДАЧ:

СТУДЕНТИ ГР. Р ____:

_____ **СТ. _____** (підпис)

_____ **СТ. _____** (підпис)

ВІДМІТКА ПРО ЗАХИСТ:

ВІДМІТКА ПРО ЗАХИСТ:		
бали	дата	підпис

Київ
 КПІ ім. Ігоря Сікорського
 20____

Додаток Б. Таблиця перетворення Лапласа

Таблиця В.1 - Зображення та оригінал деяких функцій

Оригінал	Зображення	Оригінал	Зображення
$\alpha \cdot 1(t)$	$\frac{\alpha}{p}$	$(1 - \alpha t)e^{\pm \alpha t}$	$\frac{p}{(p \mp \alpha)^2}$
$\alpha \cdot t$	$\frac{\alpha}{p^2}$	$\frac{1}{\alpha}(1 - e^{-\alpha t})$	$\frac{1}{p(p + \alpha)}$
$\beta \cdot e^{\pm \alpha t}$	$\frac{\beta}{p \mp \alpha}$	$\cos(\omega_0 t)$	$\frac{p}{p^2 + \omega_0^2}$
$\beta \cdot e^{\pm j\omega_0 t}$	$\frac{\beta}{p \mp j\omega_0}$	$\sin(\omega_0 t)$	$\frac{\omega_0}{p^2 + \omega_0^2}$
$e^{\pm j(\omega_0 t + \varphi)}$	$\frac{e^{j\psi}}{p \mp j\omega_0}$	$\sin(\omega_0 t + \psi)$	$\frac{p \cdot \sin(\psi) - \omega_0 \cdot \cos(\psi)}{p^2 + \omega_0^2}$
$te^{-\alpha t}$	$\frac{1}{(p + \alpha)^2}$	$e^{-\alpha t} \sin(\omega_0 t)$	$\frac{\omega_0}{(p + \alpha)^2 + \omega_0^2}$
$\frac{1}{\alpha - \beta}(e^{\beta t} - e^{\alpha t})$	$\frac{1}{(p + \alpha)(p + \beta)}$	$e^{-\alpha t} \cos(\omega_0 t)$	$\frac{p + \alpha}{(p + \alpha)^2 + \omega_0^2}$
t^n	$\frac{n!}{p^{n+1}}$	$\cos(\omega_0 t + \varphi)$	$\frac{p \cdot \cos(\varphi) + \omega_0 \cdot \sin(\varphi)}{p^2 + \omega_0^2}$
$ch(at)$	$\frac{a}{p^2 - a^2}$	$sh(at)$	$\frac{a}{p^2 + a^2}$
$\frac{1}{a}(e^{at} - 1)$	$\frac{1}{p(p - a)}$	$1 - e^{-t/a}$	$\frac{1}{p(1 + ap)}$
$\frac{1}{a^2}te^{-\frac{t}{a}}$	$\frac{1}{(1 + ap)^2}$	$\frac{e^{at} - e^{bt}}{a - b}$	$\frac{1}{(p - a)(p - b)}$
$(1 + at)e^{at}$	$\frac{p}{(p - a)^2}$	$\frac{1}{a^2}(e^{at} - 1 - at)$	$\frac{1}{(p - a)p^2}$
$\frac{1}{2}t^2e^{at}$	$\frac{1}{(p - a)^3}$	$(t + \frac{1}{2}at^2)e^{at}$	$\frac{p}{(p - a)^3}$
$\cos^2(at)$	$\frac{p^2 + 2a^2}{p(p^2 + 4a^2)}$	$\sin^2(at)$	$\frac{2a^2}{p(p^2 + 4a^2)}$
$ch^2(at)$	$\frac{p^2 - 2a^2}{p(p^2 - 4a^2)}$	$sh^2(at)$	$\frac{2a^2}{p(p^2 - 4a^2)}$