

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ТЕОРІЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ТА МАГНІТНИХ КІЛ

*Методичні вказівки до лабораторних робіт з використанням
середовища моделювання Microcap
Частина I*

*Затверджено на засіданні кафедри
електротехніки.
Протокол № 13 від 25.06.2021 р.*

м. Хмельницький, 2021

Теорія електричних та магнітних кіл. Методичні вказівки до лабораторних робіт з використанням середовища моделювання Містосар. Частина I / А.С. Каштальян, А.В. Горошко, В.Д. Косенков, В.Д. Бідюк. – Хмельницький: ХНУ, 2021. – 50с.

Укладачі: Каштальян А.С., к.т.н., доцент,
Горошко А.В., д.т.н., доцент,
Косенков В.Д., к.т.н., професор,
Бідюк В.Д., ст. викладач.

Відповідальний за випуск: Косенков В.Д., к.т.н., професор.

1 ПЕРЕДМОВА

Методичні вказівки до лабораторних робіт із навчальної дисципліни “Теорія електричних та магнітних кіл” для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня за спеціальністю 123 «Комп’ютерна інженерія» денної, заочної та дистанційної форм навчання складені згідно з освітньо-професійною програмою «Комп’ютерна інженерія та програмування» та робочою програмою навчальної дисципліни “Теорія електричних та магнітних кіл”.

Відповідно до Стандарту вищої освіти 123 «Комп’ютерна інженерія» та освітньо-професійної програми дисципліна має забезпечити:

компетентності: здатність до абстрактного мислення, аналізу і синтезу, вчитися і оволодівати сучасними знаннями, застосовувати знання у практичних ситуаціях, спілкуватися державною мовою як усно, так і письмово, вміння виявляти, ставити та вирішувати проблеми, здатність до розуміння предметної галузі та професійної діяльності, здатність використовувати інформаційні та комунікаційні технології, розв’язувати поставлені задачі та приймати відповідні рішення, застосовувати законодавчу та нормативно-правову базу, а також державні та міжнародні вимоги, практики і стандарти з метою здійснення професійної діяльності в галузі комп’ютерної інженерії, використовувати засоби і системи автоматизації проектування до розроблення компонентів комп’ютерних систем та мереж, Інтернет додатків, кіберфізичних систем тощо, в ідентифікувати, класифікувати та описувати роботу програмно-технічних засобів, комп’ютерних систем та кіберфізичних систем, мереж та їхніх компонентів шляхом використання аналітичних методів і методів моделювання, проектувати системи та їхні компоненти з урахуванням усіх аспектів їх життєвого циклу та поставленої задачі, включаючи створення, налаштування, експлуатацію, технічне обслуговування та утилізацію, аргументувати вибір методів розв’язування спеціалізованих задач, критично оцінювати отримані результати та захищати прийняті рішення, аналізувати, синтезувати і оптимізувати комп’ютерні та інформаційні технології з використанням математичних моделей і методів, забезпечувати проектування та розроблення якісних програмних і технічних засобів комп’ютерних систем та мереж;

програмні результати навчання: знати і розуміти наукові положення, що лежать в основі функціонування комп’ютерних засобів, систем та мереж, мати навички проведення експериментів, збирання даних та моделювання в комп’ютерних системах, вміти розв’язувати задачі аналізу та синтезу засобів, характерних для спеціальності, застосовувати знання технічних характеристик, конструктивних особливостей, призначення і правил

експлуатації програмно-технічних засобів комп'ютерних систем та мереж для вирішення технічних задач спеціальності, виконувати експериментальні дослідження за професійною тематикою, застосовувати знання з основних природничих та загально-інженерних (фундаментальних) дисциплін, а також з моделювання систем та дискретної математики при розв'язанні типових задач проектування та використання програмно-технічних засобів комп'ютерних систем та мереж; використовувати різні види та форми рухової активності для активного відпочинку та здорового способу життя.

Лабораторні заняття проводяться з метою успішного освоєння студентами теоретичного матеріалу й застосування його для вирішення практичних завдань й аналізу отриманих результатів з використанням сучасних комп'ютерних засобів навчання. Завдання до лабораторних робіт охоплюють питання розрахунку та дослідження кіл постійного струму, однофазних та трифазних кіл змінного струму.


На сьогодні при створенні та аналізі електричних кіл широко застосовуються методи цифрового моделювання, аналізу та синтезу. Запропоновані методичні вказівки призначені для застосування підходів і рішень, що дозволяють використовувати на практиці поширену систему моделювання *Microcap*. Серед переваг цієї програми: багатосторінковий графічний редактор принципів схем; поведінкове моделювання електричних кіл; літотека компонентів, що включає найбільш популярні прилади; електронна документація та контекстно-орієнтовані засоби допомоги; графіки результатів моделювання виводяться в процесі моделювання або після його закінчення; різноманітний аналіз при варіації параметрів та статистичний аналіз; доступність системи моделювання.

Всі лабораторні роботи складено за єдиною структурою. Для кожної роботи наведено її мету, завдання, теоретичні положення з теми роботи в обсязі, необхідному для виконання лабораторної роботи, що розглядається, порядок виконання роботи. Після виконання лабораторної роботи студенти складають звіт та за підсумком відповідають на контрольні запитання.

Методичні вказівки можуть бути корисними для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня студентам спеціальностей «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», «Телекомунікації та радіотехніка», «Інформаційні системи та технології», «Кібербезпека» тощо денної, заочної та дистанційної форм навчання

2 ВКАЗІВКИ ДО ВИКОРИСТАННЯ MICROCAP

Для аналізу електромагнітних процесів широко використовуються PSpice технології, зокрема програма візуального моделювання Мігросар, порядок роботи з якою розглядається нижче.

Запуск пакету Мігросар виконується запуском виконуваного файлу з розширенням exe або клацанням миші по піктограмі , яка створюється на робочому столі при установці. При запуску відкривається вікно (графічний редактор) (рис. 2.1), в якому відображається схема електричного кола, яке моделюється (зкладка Main).

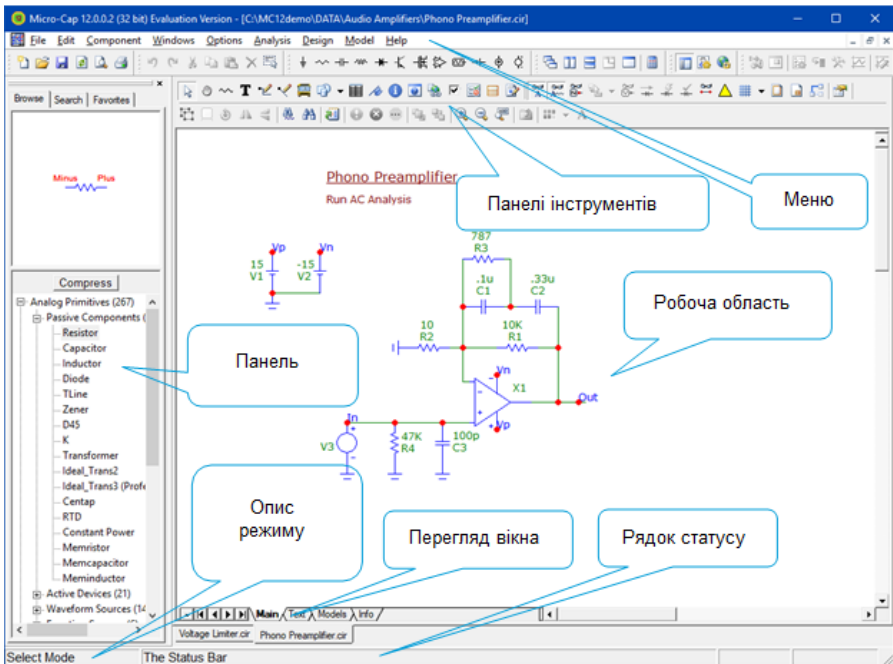



Рисунок 2.1 - Вікно програми Мігросар 12


В Мігросар використовується багатівіконний інтерфейс з меню, які спадають та розгортаються.


Меню системних команд

Меню обраної курсором команди розгортається вниз. Розглянемо основні команди.

Меню File. В меню **File** в першу чергу необхідні такі команди:


New (, Ctrl+N) – дозволяє створити новий файл допустимого Мігосар типу. Для створення нової схеми необхідно виконати команду **File – New** і в меню, яке відкривається, обрати пункт **Schematic File (.cir)** (файл схеми);


Open (, Ctrl+O) – дозволяє відкрити для редагування або аналізу схемний файл. Команда викликає діалогове вікно відкриття файлу, за допомогою якого можна відкрити схемний (.cir, .mac, .ckt) або бібліотечний файл (.lib, .lbr) та ін.;


Save (, Ctrl+S) – дозволяє зберегти схемний файл з активного вікна за іменем та шляхом, вказаним в рядку заголовка;


Save as – дозволяє зберегти схемний файл з активного вікна під іншим іменем (ім'я вказується у вікні, яке відкривається).


Меню Edit (редагування). Серед найчастіше використовуваних команд:

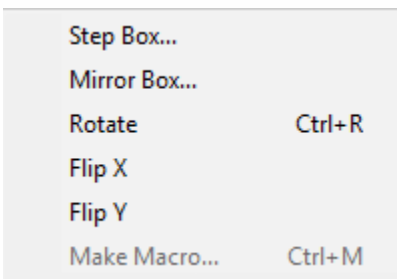
Undo (, Ctrl+Z) – відміна останньої команди редагування (відкат назад);


Redo (, Ctrl+Y) – виконання останньої відміненої команди (відкат вперед);


Cut (, Ctrl+X) – видалення обраного об'єкту та копіювання його в буфер обміну;


Copy (, Ctrl+C) – копіювання обраного об'єкту в буфер обміну;

Paste (, Ctrl+V) – копіювання вмісту буферу обміну в поточне вікно на місце, на яке вказує курсор.




Команда **Box** підменю **Edit** – редагування об'єктів, виділених прямокутною рамкою (встановлюється мишею в режимі ). Команда **Box** викликає діалогове вікно з командами:


Step Box  - дозволяє копіювати блок вказане число разів;

Mirror Box  - створює зеркально

відображений фрагмент;

Rotate  - обертає проти годинникової стрілки на 90°;

Flip Y  - зеркально відображає блок відносно вертикальної осі;

Flip X  - зеркально відображає блок відносно горизонтальної осі.

Меню Component. Це підменю підтримує роботу з ієрархічними каталогами бібліотек аналогових та цифрових компонентів. Воно має систему ієрархічних меню, які відкриваються при наведенні на них курсору миші. Меню має декілька розділів.

Розділ **Analog Primitives** містяться такі підрозділи:

Passive Components (пасивні компоненти). В розділі містяться резистори (Resistor), конденсатори (Capacitor), котушки індуктивності (Inductor), діоди (Diode), довгі лінії (TLine), стабілітрони (Zener), діоди, повернуті на 45° (D45), трансформатори (Transformer), навантаження постійної потужності (Constant Power).

Active Devices (активні пристрої). В розділі знаходяться активні компоненти: біполярні транзистори npn та pnp типів, МДН транзистори з каналами n та p типів (NMOS, PMOS), МДН транзистори з індуктованим каналом n та p типів (DNMOS, DPMOS), польові транзистори з керуючим p-n переходом з каналом n та p типів (NJFET, PJFET), операційні підсилювачі (OPAMP), арсенід-галієві польові транзистори (GaAsFET), біполярні транзистори з ізольованим затвором (IGBT).

Waveform Sources (джерела сигналів). Розділ містить джерело постійної напруги (battery), незалежні джерела напруги та струму складної форми, які залежать від часу (Voltage Source, Current Source); джерело синусоїдальної напруги (Sin Source), джерело імпульсного сигналу (Pulse Source), джерело постійного струму (Isource), джерело напруги, яке залежить від часу, що програмується користувачем у вигляді таблиці (User Source) та ін.

Function Sources (функціональні джерела). Розділ містить функціональне джерело напруги (NFV), функціональне джерело струму (NFI), залежні джерела, що задаються таблицею напруги від струму (NTVofI), струму від струму (NTIofI), струму від напруги (NTIofV), напруги від напруги (NTVofV).

Джерела NFV та NFI описуються довільною функціональною залежністю від напруг та струмі схеми.

В розділі **Analog Library** представлені моделі різноманітних аналогових компонентів.

В розділі **Digital Library** містяться бібліотеки моделей цифрових компонентів з різною технологією виготовлення.

В локалізованих версіях Microcap додані розділи з локальними аналоговими та цифровими компонентами.

Меню Windows. Меню містить команди роботи з вікнами. Вікна можна розташовувати каскадом, по вертикалі або горизонталі, масштабувати, викликати вбудований калькулятор, виводити перелік бібліотек, перелічених в файлі каталозі NOM.lib та ін.

Меню Options. Меню містить команди для вибору режиму редагування та задання різних параметрів програми Місгосар.

За замовчуванням в програмі Місгосар встановлено американський стандарт (Main) умовних графічних зображень (УГЗ) компонентів. Однак можливо встановлення європейського стандарту (Euro), в якому УГЗ компонентів ближче до вітчизняних стандартів. Вибір стандарту, який буде використовуватися в даній схемі, здійснюється у вікні властивостей для нових схем (шлях до вікна: меню Options – Default Properties For New Circuits) (рис. 2.2).

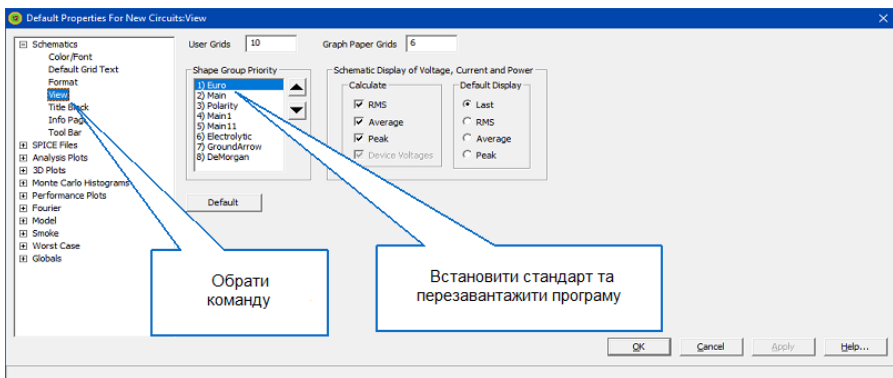


Рисунок 2.2 - Вибір стандартів УГЗ у вікні Default Properties For New Circuits

Меню Analysis. Меню містить команди запуску різних режимів моделювання.





Transient (Alt+1) – розрахунок перехідних процесів в схемі. Дозволяє будувати залежності від часу різних змінних станів схеми та спостерігати їх в графічному вікні.

AC (Alt+2) – розрахунок частотних характеристик схеми. Дозволяє будувати частотні залежності різних змінних схеми при подачі на вхід гармонічного впливу із змінною частотою та постійною амплітудою.

DC (Alt+3) – розрахунок передаточних функцій по постійному струму (при варіації постійної складової одного або двох джерел сигналів, варіації температури або параметрів моделей компонентів).

Dynamic DC (Alt+4) – розрахунок режиму по постійному струму та динамічне відображення на схемі вузлових потенціалів, струмів віток та потужності розсіювання. В цьому режимі можна змінювати напруги батарей, значення резисторів за допомогою Sliders або курсорних клавіш, редагувати схему, додаючи або видаляючи компоненти, змінюючи значення параметрів та ін.

Dynamic AC (Alt+5) – розрахунок режиму по змінному струму та динамічне відображення на схемі вузлових потенціалів, струмів віток та потужності.

Кнопка  -Node Numbers здійснює нумерацію вузлів схеми. Мікросар одразу після проведених змін розраховує режим по постійному струму та показує значення вузлових потенціалів ( - Node Voltages), струмів віток ( - Currents), та потужностей розсіювання ( - Powers).

Після переходу в режим аналізу перехідних процесів програма здійснює перевірку правильності складання схеми. За відсутності помилок в схемі програма складає її топологічний опис, виконує підготовку до чисельного розрахунку перехідних процесів та відкриває вікно задання параметрів моделювання Transient Analysis Limits (рис. 2.3)

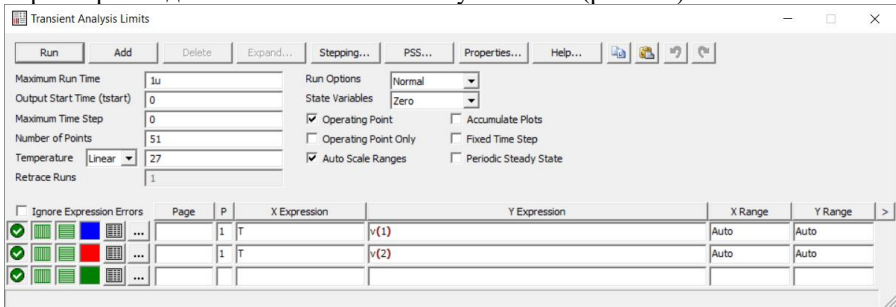


Рисунок 2.3 – Параметри аналізу перехідних процесів

У вікні задання параметрів розрахунку перехідних процесів є такі розділи: команди, числові параметри, вирази та опції.

Розділ команд містить:

Run – початок моделювання. Натискання клавіші F2 також починає моделювання.

Add – додавання ще одного рядка специфікації вивода результатів після рядка, відміченого курсором. В цьому рядку встановлюється спосіб відображення результатів та аналітичні вирази для побудови графіків.

Delete – видалення рядка специфікації вивода результатів, відміченого курсором.

Expand – відкриття додаткового вікна для вводу тексту більшого розміру при розташуванні курсору в одній з граф, що містять вирази, наприклад, **Y Expression**.

Stepping – відкриття діалогового вікна задання варіації параметрів.

В розділ числові параметри входять:

Maximum Run Time – час розрахунку перехідних процесів.

Output Start Time – початковий час розрахунку перехідних процесів.

Maximum Time Step – максимальний крок інтегрування.

Number of Points – число точок, які виводяться в таблиці, тобто кількість рядків в таблиці виводу результатів.

Temperature – діапазон зміни температури.

Розділ виразів містить:

X Expression – ім'я змінної, яка відкладається по осі X. Зазвичай при аналізі перехідних процесів по цій осі відкладається час (змінна T).

Y Expression – математичний вираз для змінної, яка відкладається по осі Y. Це може бути проста змінна типу напруга у вузлі V(5), падіння напруги на двополосному компоненті V(R1) або струм вітки I(R1), або математичний вираз, наприклад V(R1)*I(R1).

X Range – максимальне та мінімальне значення змінної X на графіку High [Low]. Для автоматичного вибору діапазону змінних в цій графі вказується Auto.

Y Range – максимальне та мінімальне значення змінної Y на графіку.

В розділі опції передбачається здійснення вибору режимів дослідження:

Operation Point – ввімкнення режиму по постійному струму перед початком кожного розрахунку перехідних процесів. Дані цього режим замінюють значення всіх початкових умов, якщо вони були встановлені.

Operation Point Only – розрахунок тільки режиму по постійному струму.

Auto Scale Ranges – присвоєння ознаки автоматичного масштабування по осям X, Y для кожного нового варіанту розрахунків.

Меню Design містить команди для синтезу активних та пасивних аналогових фільтрів.

Меню Model дає можливість обраховувати параметри математичних моделей напівпровідникових приладів та магнітних осердь за експериментальними даними або довідниковими матеріалами, введеними у табличній або графічній формі.

В програмі Місгосар здебільшого використовуються ті ж математичні моделі напівпровідникових приладів, що і в програмі Pspice та пакеті програм DesignLab.

При введенні графіків повинні бути задані координати характерних точок (від двох до п'яти – чим більше даних, тим точніше обчислюються параметри моделей). Якщо детальні дані для деяких експериментальних точок відсутні, використовується єдина доступна пара з довідника. Необхідні дані для напівпровідникових приладів записуються у вигляді чисел. Якщо дані відсутні, то приймаються їх значення за замовчуванням.

Для феромагнітних осердь трансформаторів, дроселів і котушок індуктивності передбачена можливість створювати нелінійні моделі магнітних осердь за довідковими даними. Можливий облік гістерезисної

залежності магнітної індукції B і намагніченості M в феромагнетику від напруженості зовнішнього магнітного поля H .

Меню Help містить команди роботи із засобами вбудованої допомоги.

Функціональні клавіші Microcap

F1	виклик меню допомоги Help
F2	початок моделювання після вибору одного з видів аналізу в меню Run
F3	вихід з режимів AC , DC або Transient Analysis і повернення в вікно схем Schematic Editor . У вікні схем натискання клавіші F3 повторює пошук об'єкту
F4	відображення вікна графіків результатів аналізу (наприклад, якщо було відкрито вікно текстового вихідного файлу)
Ctrl+F4	закриття активного вікна
F5	відображення текстового вихідного файлу у вікні Numeric Output
F6	повернення до вихідного масштабу в обраному вікні графіків
Ctrl+F6	циклічне перемикання відкритих вікон
F7	перемикання в режим Scale масштабування фрагмента графіка на весь екран
F8	перемикання в режим електронного курсору Cursor вимірювання координат графіків
F9	очищення вікна графіків в режимі Probe і виклик вікна завдання параметрів Analysis Limits в режимі аналізу характеристик
Ctrl+F9	видалення всіх графіків
F10	відкриття вікна Properties (властивості)
F11	відкриття вікна зміни параметрів Parameter Stepping (в режимі Transient Analysis)
F12	виклик редактора змінних стану State Variables Editor (в режимі Transient Analysis)

Введення принципової схеми

Параметри всіх електронних компонентів задаються при доданні в принципову схему. Для розміщення компонента на схемі слід обрати його в меню **Component**. В розділі **Components – Analog Primitives** резистори (**Resistor**) та конденсатори (**Capacitor**) знаходяться в підрозділі **Passive Components**, напівпровідникові прилади – в розділі **Active Components**, джерела сигналу – розділі **Waveform Source**. Часто деякі пасивні та активні

компоненти зручніше вводити за допомогою піктограм на верхній панелі інструментів (рис. 2.4).

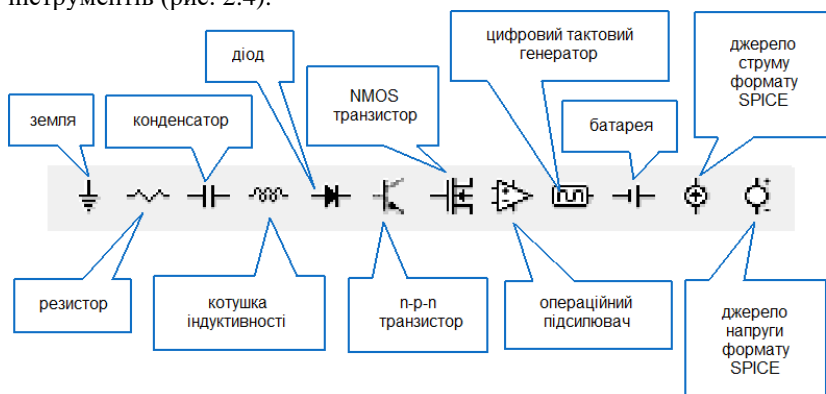



Рисунок 2.4 - Верхня панель інструментів

Крім того в Microcap є панель компонентів, яка розташовується в лівій частині екрану та вмикається/вимикається командою меню **Options** –

Panel (комбінація Ctrl+Alt+X) або кнопкою  на панелі інструментів. Ця панель суттєво підвищує зручність вибору необхідних компонентів.

Після вибору компоненту клацанням лівої кнопки миші його УГЗ з'являється у вікні графічного редактора. Його встановлюють в потрібну точку схеми, не відпускаючи натиснену ліву кнопку миші. Якщо необхідно змінити орієнтацію компонента на схемі, то при натисненій лівій кнопці миші натискають праву кнопку. Кожне таке натискання повертає зображення на 90° за годинниковою стрілкою.

Відпускання лівої кнопки миші закріпить компонент в точці, вказаній курсором. При цьому відкриється відповідне діалогове вікно для введення значення параметрів компонента та його імені (рис. 2.5).

Параметри компонента можна відредагувати в будь-який момент, діалогове вікно редагування параметрів відкривається клацанням лівої клавіші миші по компоненту схеми.

Введення номінальних значень компонентів здійснюється в системі СІ, за виключенням котушки з магнітним (нелінійним) осердям. В Microcap ціла частина відділяється від дробової частини крапкою. Значення компонентів задаються або безпосередньо числовим значенням (наприклад, 1100), або в показниковій формі (1.1E3).

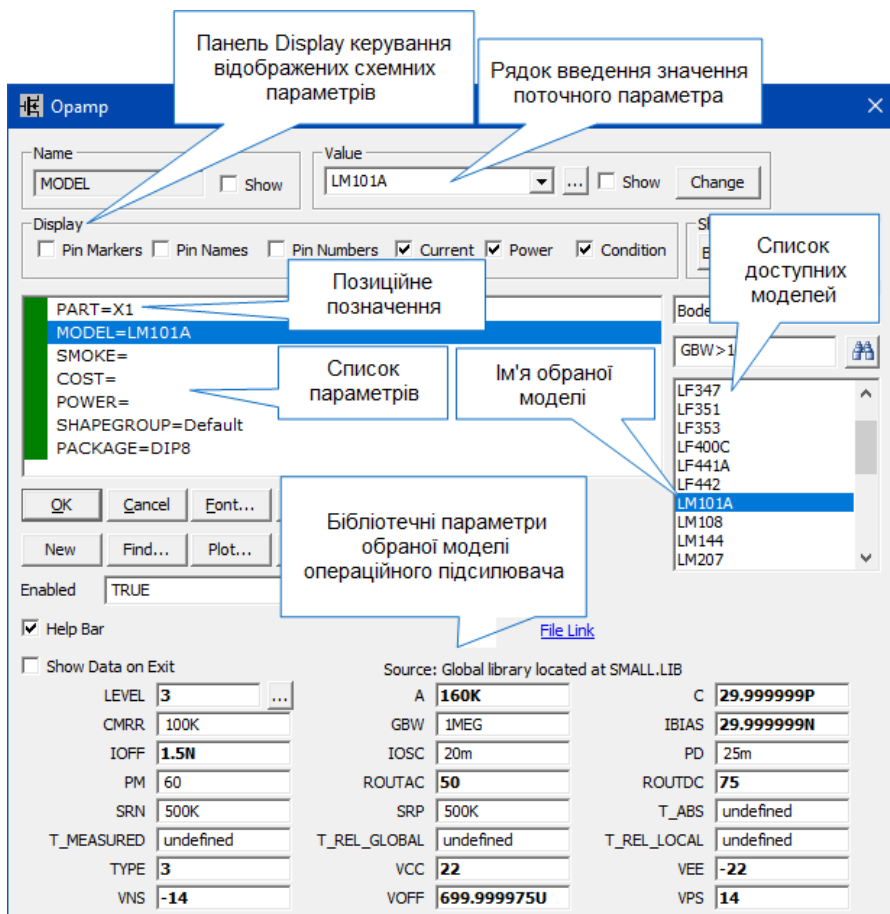


Рисунок 2.5 - Приклад діалогового вікна параметрів компонента

Для зручності та економії місця (особливо на осях X, Y графіків результатів моделювання) можна застосовувати літерні множники (табл. 2.1), які набирають в латинському реєстрі та ставлять після чисельного значення величини (без пробілу), наприклад 2.7K або 100u.

Таблиця 2.1. – Літерні позначення множників для чисельних значень

10^{-15}	10^{-12}	10^{-9}	10^{-6}	10^{-3}	10^3	10^6	10^9	10^{12}
фемпто	піко	нано	мікро	мілі	кіло	мега	гіга	тера
F (f)	P (p)	N (n)	U (u)	M (m)	K (k)	MEG (meg)	G (g)	T (t)

В заголовку діалогового вікна для введення значень параметрів компонента (рис. 2.5) вказується коротка інформація про компонент.

Важливі параметри, які задаються при виборі компонента:

- Панель з лівого боку **Name** – відображає ім'я компонента.
- Параметр **Part** – задає позиційне позначення елемента на принциповій схемі (наприклад, R1, C2, L1).

- Параметр **Value** – задає значення обраного параметра. Зокрема, номінал елемента (наприклад, 5.6k, 470pF, 25mH). Величина номіналу будь-якого пасивного компонента (опір резистора, ємність конденсатора, індуктивність котушки) може визначатися не тільки числом, але й будь-якою функцією вузлових напруг схеми, струмів віток, часу та температури.


- Кнопка **Change** панелі **Value** керує встановленням значень (чисел, записаних в позиції **Value**, **Capacitance**, **Inductance**, **Resistance**) однотипних компонентів. Використання кнопки **Change** дозволено при виборі параметра **Value** (або аналогічних йому) в списку параметрів компонента.


- Параметр **Model** – дозволяє обрати модель (еквівалентну схему заміщення) конкретного електронного компонента з списку в правій частині діалогового вікна (наприклад, модель операційного підсилювача LM101A). Для пасивних елементів цей параметр, як правило, не задається.

Набір атрибутів, які відображаються, визначається встановленням прапорця відображення **Show** (показати) для відповідних позицій.

Якщо при введенні схеми незрозуміло, яку модель необхідно використовувати або необхідної моделі немає в списку, то можна використовувати узагальнену модель для даного типу компонента - \$Generic (звичайно вона перша в списку), яка в більшості випадків дає задовільні результати. Потім її можна замінити на більш точну модель.

Після встановлення електронного компонента на поле електричної схеми необхідно з'єднати провідниками його виводи з виводами інших елементів схеми.

Перехід в режим проведення ліній зв'язку (провідників) здійснюється натисненням на піктограму  (Wire Mode, Ctrl+W). Якщо

Виникає необхідність проведення провідників за довільними напрямками, необхідно обрати режим .

Якщо провести один провідник, а після цього його перетнути іншим – провідники електрично не з'єднуються. Щоб з'єднання одного провідника з іншим провідником відбулось, необхідно довести цей провідник до точки перетину, клацнути лівою клавішею миші, і потім продовжувати провідник далі. Червона точка, яка з'явиться (рис. 2.6), сигналізує, що з'єднання провідників відбулося.

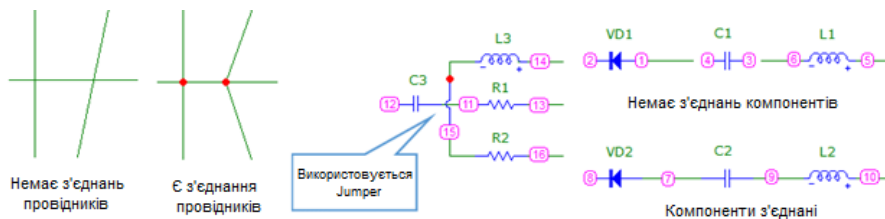




Рисунок 2.6 – Приклади з'єднання провідників


Іноді необхідно протягнути провідник через точку виводу компонента, однак з'єднання з ним не передбачено. В цьому випадку необхідно використовувати спеціальний компонент **Jumper** (перемичка). Знайти компонент **Jumper** можна за шляхом **Component – Analog primitives – Connectors** або використовуючи ліву панель компонентів.

Номери вузлів (рис. 2.6) проставляються на схемі натисненням на піктограму . В подальшому вони необхідні для побудови графіків перехідних процесів та частотних характеристик схем.

Місгосар формує математичну модель (систему рівнянь) введеної схеми методом вузлових потенціалів, тому для роботи програми необхідно, щоб хоча б один вузол схеми (опорний вузол) був заземлений. Опорний вузол завжди має нулевий номер (на схемі він не відображається). Елемент заземлення (Ground) обирається або на панелі інструментів або в меню **Component – Analog primitives – Connectors** (елементи з'єднання).

Якщо виводи компонентів не з'єдані проведеним провідником, то з'явиться додатковий вузол (наприклад, провідник не довели до виводу другого компонента). На рис. 2.6 виводи компонентів *VD1* та *C1* не з'єдані, не з'єдані також і виводи компонентів *C1* та *L1*. Якщо з'єднання виводів компонентів відбулося, то на всій протяжності провідника та на всіх точках виводів компонентів номер вузла повинен знаходитись тільки в одному місці (вузли 7 та 8 на рис. 2.6).

Для переміщення окремих компонентів або ділянок схеми необхідно на інструментальній панелі обрати інструмент **Select Mode** . Щоб обрати компонент в цьому режимі потрібно натиснути один раз лівою клав'яшою миші. Обраний компонент можна переміщувати характерним для Windows способом – утримуючи натиснутою ліву клав'яшу миші. При натиснутій лівій клав'яші миші також можна виділити частину схеми з компонентами та з'єднаннями та далі перенести її в потрібне місце.

При редагуванні схеми корисний режим «гумові з'єднання». Для його ввімкнення слід натиснути кнопку  на інструментальній панелі. Режим можна також вмикати використовуючи шлях в меню **Options – Mode – Rubberbanding** або комбінацію клав'ш **Ctrl + Shift + R**. В режимі «гумові

з'єднання» при переміщенні компонента (або виділеного блока) за ним будуть тягнутися провідники із збереженням електричного з'єднання.

Для редагування параметрів та атрибутів компонента потрібно виконати по ньому подвійне клацання миші. З'явиться відповідне діалогове вікно, в якому можна буде змінювати значення параметрів.

Для того щоб в Мігосар сформувалась математична модель схеми, потрібно врахувати ряд обмежень, невиконання яких приводить до появи топологічно вироджених кіл (кіл, які містять контури, що складаються з ідеальних ємностей, індуктивностей та джерел напруги, а також що містять зірки, що складаються з індуктивностей та ідеальних джерел струму). Топологічно вироджені схеми приводять до появи неповних систем диференційних рівнянь, порядок яких буде менше числа реактивних елементів, і розв'язок яких чисельними методами неможливий.

Основна вимога – один з вузлів схеми обов'язково має бути приєднаний до «землі», а всі інші вузли схеми повинні мати електричний гальванічний зв'язок з цим вузлом.

3 ЛАБОРАТОРНІ РОБОТИ

Робота №1. Дослідження послідовного електричного кола постійного струму

Мета роботи: навчитися використовувати середовище моделювання Мігосар, дослідити послідовне електричне коло постійного струму.

Завдання. Засвоїти основи роботи з середовищем моделювання Мігосар, засвоїти основні закони електричних кіл та методи розрахунку послідовних електричних кіл.

Вимоги до звіту. Звіт повинен містити: назву роботи, завдання, відомості про послідовність виконання роботи, схеми дослідів, результати обчислень, відповідні схеми та графіки.

Основні теоретичні відомості

Електричне коло – це сукупність пристроїв, що утворюють шлях для проходження електричного струму, електромагнітні процеси в яких можна описати за допомогою понять про електрорушійну силу, струм і напругу. Елементи електричного кола – це окремі пристрої, що входять до складу кола та виконують в ньому певні функції. Основні елементи електричних кіл – джерела і споживачі електричної енергії. У споживачах електрична енергія перетворюється у теплову, механічну, світлову та інші види енергії. В

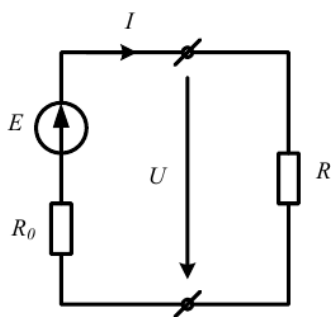


Рисунок 3.1 – Просте електричне коло

джерелах – теплова, механічна, світлова, хімічна енергія перетворюється в електричну. У процесі перетворення різних видів енергії в електричну у джерелі виникає ЕРС (електрорушійна сила), яка спричинює електричний струм у замкненому колі. В ході цього перетворення частина енергії втрачається в самому джерелі. Тому джерела характеризуються двома параметрами – ЕРС E та внутрішнім опором R_0 . Споживачі енергії характеризуються тільки опором R . Для зображення і розрахунку електричних кіл замінюють електричними схемами, використовуючи умовні зображення.

Найпростіше електричне коло зображено на рис. 3.1.

Струм у цьому колі та напругу на його ділянках визначають за допомогою закону Ома, який можна використати як для усього кола, так і для окремих його ділянок.

Закон Ома: для всього кола - $I = \frac{E}{R_0 + R}$; для ділянки кола без ЕРС -

$I = \frac{U}{R}$; для ділянки кола з ЕРС - $I = \frac{E - U}{R_0}$. Тут I – електричний струм, А;

U – електрична напруга на споживачі; R_0, R – опори джерела та споживача відповідно, Ом. За законом Ома експериментально можна визначити параметри електричного кола, якщо виміряти струм I та напругу U .

Порядок виконання роботи

1. Запустити додаток Мігросар. Ознайомитись з його функціональними можливостями.

2. Створити принципову схему, представлену на рис. 3.2. Схема складається з послідовно з'єднаних постійної ЕРС з напругою $V1$ та активних опорів $R1$ та $R2$. При цьому опір $R1$ не змінюється в процесі моделювання. Величини напруги $V1$ та опору $R1$ обираються з табл. 3.1 відповідно до варіанту.

3.

Таблиця 3.1. Варіанти вибору завдань

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$V1, В$	1	1,2	1,3	1,5	0,8	1,6	2	1,8	2,2	2,5	3	2,8	2,3	2,1	0,9
$R1, Ом$	10	8	8	6	12	12	8	10	12	20	8	18	15	12	15

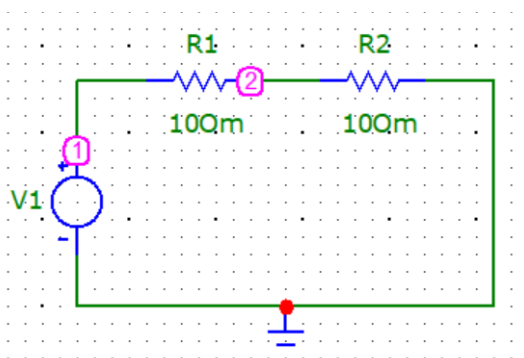


Рисунок 3.2 – Схема послідовного електричного кола постійного струму

4. Визначити:

- залежність струму, що протікає в колі, як функції опору $R2$, значення якого необхідно обрати із списку допустимих номіналів;
- потужність, яка виділяється на опорах $R1$ та $R2$;

- значення опору R2, при якому потужність, яка виділяється в цьому опорі, є максимальною;
- результати вимірювань занести до табл. 3.2 та побудувати графіки.

Таблиця 3.2. Результати вимірювань

R2, Ом	0	5	10	15	20	25
I, А						
P, Вт						

Список допустимих номіналів включає в себе діапазон зміни опору R2 від 0 до 25 Ом. Крок зміни опорів 5 Ом.

Рекомендації до побудови схеми та моделювання.

Необхідно встановити елементи схеми на робочому столі. Для цього потрібно за допомогою курсору миші зайти в меню **Component – Waveform sources – Voltage source**, обрати джерело постійної напруги V1, встановити в робоче вікно та записати необхідне номінальне значення. Аналогічним чином потрібно обрати активні опори R1 та R2. Для цього необхідно зайти в меню **Components – Analog Primitives – Passive Components – Resistor**, обрати його, також встановити на робочому полі та задати початкові значення опорів. Після чого необхідно з'єднати всі елементи в одне послідовне коло в режимі **Wire Mode**. Необхідною умовою роботи будь-якої схеми, створеної в даному пакеті, є наявність заземлення. Заземлення встановлюється за допомогою команди **Component – Analog Primitives – Connectors – Ground**.

Для виконання вказаних вище завдань необхідно скористатися функцією аналізу перехідних процесів, обрати в командному меню **Analysis – Transient**. У вікні **Transient Analysis Limits**, яке відкриється потрібно ввести такі параметри (рис. 3.3):

- діапазон моделювання – **Time range: 10мс**;
- встановити галочку в опцію автоматичного масштабування – **Auto Scale Range**;
- задати ім'я змінної по осі – **X Expression: T**;
- в графі P в кожному рядку вказати числа від 1 до 3 для того, щоб побудувати графіки в різних вікнах;
- задати вирази для змінних, що відкладаються по осі – **Y Expression:**
 - a) $v(r2)$ – падіння напруги на опорі R2;
 - b) $i(r2)$ – струм через опір R2;
 - c) $i(r2)*v(r2)$ – потужність, яка виділяється на опорі R2.

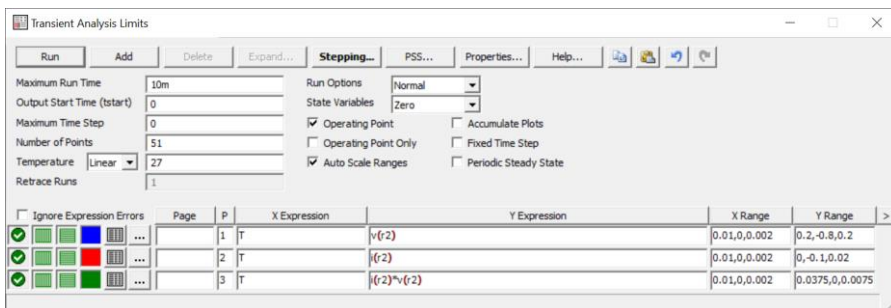


Рисунок 3.3 – Параметри аналізу перехідних процесів

Далі потрібно натиснути кнопку **Run**. На екрані з'явиться вікно, показане на рис. 3.4.

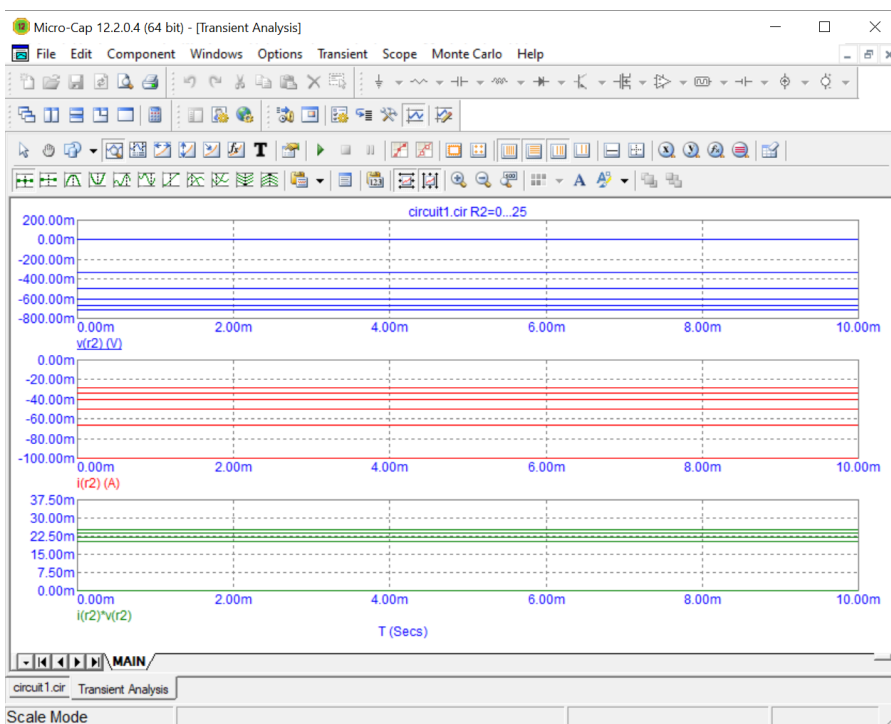


Рисунок 3.4 - Вікно програми під час виконання

Для визначення значення опору $R2$, при якому потужність, що виділяється на ньому, буде максимальною, можна використати команду

Stepping у вікні **Limits**. Дана команда дозволяє задавати діапазон зміни номінального значення відповідного параметра, тобто будуються криві перехідних процесів при різних номінальних значеннях.

При виборі команди **Stepping** з'являється нове вікно, показане на рис. 3.5.

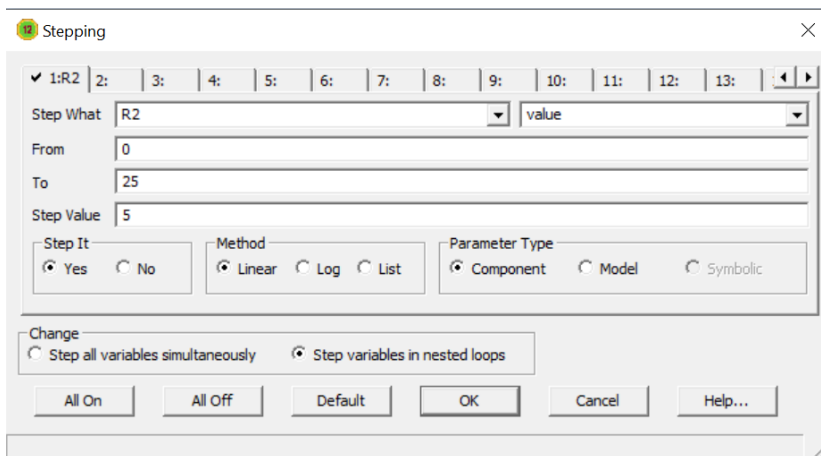


Рисунок 3.5 – Параметри Stepping аналізу перехідних процесів

В цьому вікні задаються такі параметри:

- **Step What** – обирається елемент з списку всіх елементів схеми, обрати R2;
- **From** – початкове номінальне значення параметра, що змінюється, встановити рівним нулю;
- **To** – кінцеве номінальне значення параметра, що змінюється, встановити рівним 25 Ом;
- **Step Value** – крок зміни значення параметра, задати 5 Ом;
- **Step It** – статус ввімкнений – Yes або вимкнений No, встановити Yes.

Для повторного входу в режим задання параметрів елемента необхідно ввійти в меню **Transient** – **Stepping**. Після запуску аналізу на графіках відобразиться сімейство кривих при різних значеннях параметра (рис. 3.3).

Питання для самоконтролю

1. Чим відрізняється складне електричне коло від простого?
2. Як визначити з досліду параметри електричного кола постійного струму?

3. Послідовне з'єднання приймачів в електричному колі.
4. Закон Ома.
5. Закони Кірхгофа.
6. Активні елементи кіл. Еквівалентна заміна джерела ЕРС та джерела струму.

Перелік рекомендованих джерел

1. Косенков В.Д. Теорія електричних кіл. Навчальний посібник/ В.Д. Косенков, А.С. Каштальян, В.Д. Бідюк// Хмельницький: ХНУ, 2017. – 255с [с.5-23].
2. Форкун Я. Б. Конспект лекцій з курсу «Теорія електричних та магнітних кіл» / Я. Б. Форкун, М. Л. Глебова: Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, – 2017. – 124 с [с.8-14].
3. Alexander С.К. Fundamentals of Electric Circuits/ Charles K. Alexander, Matthew N.O. Sadiku// New York: McGraw-Hill Education, 2017 – 990p [с.4-43].

Робота №2. Дослідження змішаного електричного кола постійного струму

Мета роботи: Дослідити схему з двома паралельними вітками та вплив параметрів схеми на вольт-амперні характеристики.

Завдання: Побудувати схему з двома паралельними вітками та визначити вплив параметрів схеми на вольт-амперні характеристики.

Вимоги до звіту. Звіт повинен містити: назву роботи, завдання, відомості про послідовність виконання роботи, схеми дослідів, результати обчислень, відповідні схеми та графіки.

Теоретичні відомості

Послідовним з'єднанням елементів називають з'єднання, при якому по цих елементах протікає один і той же струм (рис. 3.6). При цьому за другим законом Кірхгофа

$$U = U_1 + U_2 + \dots + U_n = IR_1 + IR_2 + \dots + IR_n = I(R_1 + R_2 + \dots + R_n) = IR_E,$$

$$\text{де } R_E = R_1 + R_2 + \dots + R_n.$$

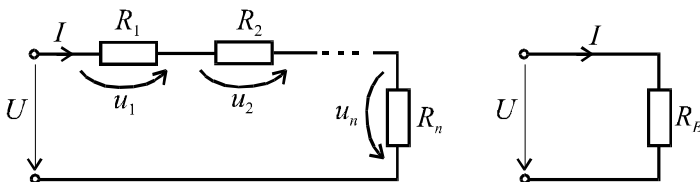


Рис. 3.6. Еквівалентний опір при послідовному з'єднанні елементів

$$\text{Баланс потужності } P_{\text{дж}} = \sum_{k=1}^n P_{\text{к.пр.}}$$

Паралельним з'єднанням елементів називають з'єднання, при якому ці елементи знаходяться під однією напругою (рис. 3.7).

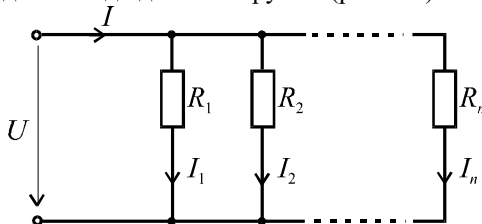


Рис. 3.7. Паралельне з'єднання елементів

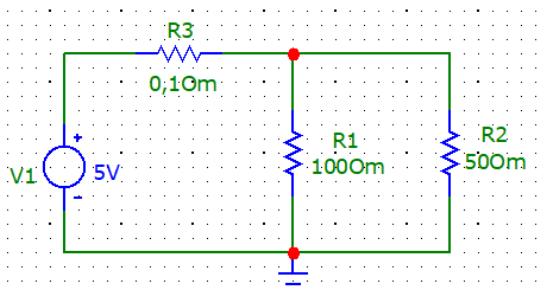


Рисунок 3.10 - Схема паралельного з'єднання опорів

2. Визначити:

- залежність струму, що протікає в колі, як функції опору R_1 , R_2 , R_3 ;
- потужність, яка виділяється на опорах R_1 та R_2 . Значення опору R_2 необхідно обрати з списку допустимих номіналів;
- значення опору R_2 , при якому потужність, що виділяється в цьому опорі, є максимальною;
- результати вимірювань занести до табл. 3.4 та побудувати графіки.
-

Таблиця 3.4 - Результати вимірювань

R_2 , Ом	40	45	50	55	60
I , А					
P , Вт					

Список допустимих номіналів включає в себе діапазон опору від 40 до 60 Ом. Крок зміни опору 5 Ом.

Графіки залежностей струмів побудувати на одному графіку, а потужності, які виділяються на опорах, на іншому.

3. Скласти електричну принципову схему, зображену на рис. 3.11. Дана схема складається з послідовно з'єднаних постійної ЕРС з напругою V_1 та активних опорів R_4 та R_1 . Паралельно R_1 підключені опори R_2 та R_3 . При цьому опори R_1 , R_3 та R_4 не змінюються в процесі моделювання. Величини V_1 , R_1 , R_3 та R_4 обираються з табл. 3.5 відповідно до варіанту.

Таблиця 3.5. - Варіанти вибору завдання

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
V_1 , В	1	1,2	1,3	1,5	0,8	1,6	2	1,8	2,2	2,5	3	2,8	2,3	2,1	0,9
R_1 , Ом	100	90	95	110	120	105	90	120	100	150	85	110	180	120	85
R_3 , Ом	70	75	60	65	50	55	80	85	50	55	70	75	60	65	50

R4, Ом	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1
--------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

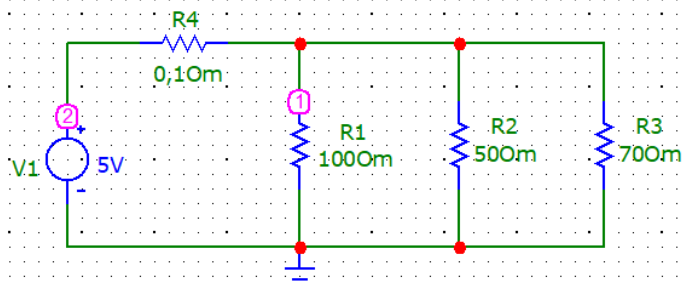


Рисунок 3.11. - Схема змішаного з'єднання опорів

4. Визначити:

- напругу на опорі R2;
- залежність струму, що протікає в колі, як функції опору R1, R2, R3, R4;
- потужність, яка виділяється на опорі R2, значення якого необхідно обрати із списку допустимих номіналів;
- значення опору R2, при якому потужність, що виділяється в цьому опорі, є максимальною;
- результати вимірювань занести до табл. 3.6 та побудувати графіки.

Таблиця 3.6. Результати вимірювань

R2, Ом	40	45	50	55	60
I, А					
P, Вт					

Список допустимих номіналів включає в себе діапазон зміни опору від 40 до 60 Ом. Крок зміни опору 5 Ом.

Графік напруги на опорі R2 побудувати на одному графіку, графіки залежностей струмів побудувати на другому графіку, а потужність, яка виділяється на опорі, на третьому.

Питання для самоконтролю

1. Послідовне та паралельне зєднання приймачів.
2. Змішане зєднання приймачів.
3. Закон Ома та закони Кірхгофа.
4. Активні елементи кіл. Еквівалентна заміна джерела ЕРС та джерела струму.
5. Розрахунок кіл постійного струму з одним джерелом живлення.

Перелік рекомендованих джерел

1. Косенков В.Д. Теорія електричних кіл. Навчальний посібник/ В.Д. Косенков, А.С. Каштальян, В.Д. Бідюк// Хмельницький: ХНУ, 2017. – 255с [с.23-41].
2. Форкун Я. Б. Конспект лекцій з курсу «Теорія електричних та магнітних кіл» / Я. Б. Форкун, М. Л. Глебова: Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, – 2017. – 124 с [с.14-23].
3. Alexander С.К. Fundamentals of Electric Circuits/ Charles K. Alexander, Matthew N.O. Sadiku// New York: McGraw-Hill Education, 2017 – 990p [с.43-96].

Робота №3. Дослідження простих кіл синусоїдального струму.

Мета роботи: Вивчення кіл синусоїдального струму з послідовно ввімкненим пасивним елементом.

Завдання: Дослідити кола синусоїдального струму з одним послідовно ввімкненим елементом та вплив параметрів схема на ВАХ та на кути зсуву фаз між струмом та напругою. На сьогодні для більшості електричних мереж прийнята частота синусоїдального струму 50 Гц – загальнопромислова частота (в США і Японії – 60 Гц). Проте у різних галузях промисловості зустрічаються інші стандарти частоти. Наприклад, у електротермічних установках використовують діапазон частот 500 Гц-50 кГц.

Вимоги до звіту. Звіт повинен містити: назву роботи, завдання, відомості про послідовність виконання роботи, схеми дослідів, результати обчислень, відповідні схеми та графіки.

Теоретичні відомості

Основною перевагою змінного синусоїдального струму, що обумовлює його широке застосування, є можливість передачі енергії на великі відстані з незначними втратами, а також просте перетворення електричної енергії за допомогою трансформаторів.

Якщо струм в резистивному елементі синусоїдальний $i_R = I_{Rm} \sin(\omega t + \varphi_i)$, то згідно із законом Ома напруга, прикладена до елемента дорівнює $u_R = Ri_R = RI_{Rm} \sin(\omega t + \varphi_i) = U_{Rm} \sin(\omega t + \varphi_U)$. Для резистивного елемента струм і напруга співпадають по фазі $\varphi_i = \varphi_U$, а діючі значення напруги і струму пов'язані між собою співвідношенням $U_R = RI_R$.

Індуктивний елемент схеми заміщення характеризує наявність змінного магнітного поля, створеного струмом, що протікає у колі. У колі змінного струму, всяка зміна струму в провіднику супроводжується зміною потокощеплення ψ_L цього провідника, що викликає появу ЕРС самоіндукції в цьому елементі e_L . Це явище отримало назву самоіндукції.

ЕРС самоіндукції визначається швидкістю зміни власного потокощеплення $e_L = \frac{d\psi_L}{dt}$.

Величина власного потокощеплення індуктивного елемента пропорційна величині струму в ньому $\psi_L = Li$, де L – власна індуктивність елемента. Якщо магнітне поле утворюється в немагнітному середовищі, залежність $\psi_L(i)$ є лінійною і індуктивність елемента $L = const$. Для котушок індуктивності з магнітним осердяем індуктивність залежить від струму, що протікає.

Напряг ЕРС самоіндукції $e_L = L \frac{di}{dt}$ визначається знаком похідної

струму за часом. При збільшенні струму, ЕРС самоіндукції спрямована зустрічно по відношенню до напрямку протікання струму і віднімається із прикладеної напруги (перешкоджає збільшенню струму). При зменшенні струму напряг ЕРС самоіндукції збігається з напрямом струму, ЕРС самоіндукції складається з прикладеною напругою (прагне підтримати струм постійним).

При синусоїдальному струмі в індуктивному елементі $i_L = I_{Lm} \sin(\omega t + \varphi_i)$ за законом електромагнітної індукції напруга на індуктивному елементі дорівнює

$u_L = -e_L = L \frac{di}{dt} = \omega L I_{Lm} \cos(\omega t + \varphi_i) = U_{Lm} \sin\left(\omega t + \varphi_i + \frac{\pi}{2}\right)$, де амплітуди струму і напруги пов'язані співвідношенням $U_{Lm} = \omega L I_{Lm} = X_L I_{Lm}$, діючі значення відповідно $U_L = \omega L I_L = X_L I_L$, а їх початкові фази - $\varphi_U = \varphi_i + \frac{\pi}{2}$.

Величину X_L називають індуктивним опором.

Ємність C враховує зміну енергії електричного поля. Напруга u і струм i ємнісного елемента пов'язані рівнянням $i = \frac{dq}{dt} = C \frac{du_C}{dt}$, де $q = Cu$ - заряд конденсатора. Якщо u_C напруга на ємнісному елементі зростає, то струм позитивний. Тобто в даний момент часу струм має напрямок, що збігається з умовно позитивним напрямком напруги u_C . Заряд і енергія електричного поля між обкладками конденсатора $W_C = \frac{Cu_C^2}{2} = \frac{qu_C}{2}$ при цьому зростають. Енергія від джерела передається електричному полю. Коли напруга u_C зменшується, зменшується і заряд, а енергія, що запасена в електричному полі повертається назад у джерело. Отже, ємнісний елемент схеми заміщення відображає обмін енергією між джерелом і електричним полем.

Якщо напруга між виводами ємнісного елемента змінюється синусоїдально $u_C = U_{Cm} \sin(\omega t + \varphi_U)$, то струм через ємнісний елемент

$i_C = C \frac{du_C}{dt} = \omega C U_{Cm} \cos(\omega t + \varphi_U) = I_{Cm} \sin\left(\omega t + \varphi_U + \frac{\pi}{2}\right)$, де амплітуди

напруги і струму пов'язані співвідношенням $U_{Cm} = \frac{I_{Cm}}{\omega C}$, діючі значення

струму і напруги відповідно $U_c = \frac{I_c}{\omega C} = I_c X_c$, а початкові фази $\varphi_U = \varphi_i - \frac{\pi}{2}$.

Величина $X_c = \frac{1}{\omega C}$ називається ємнісним опором.

Порядок виконання роботи

1. Зібрати електричні кола з синусоїдальним джерелом напруги, зображені на рис. 3.12.

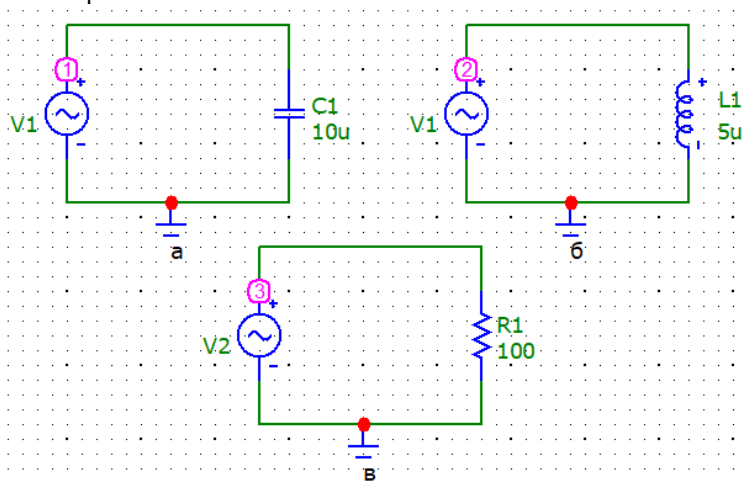


Рисунок 3.12 – Прості кола синусоїдального струму

2. Для всіх джерел напруги задати номінальні значення 5 В та частоту 100 Гц. Початкові значення для трьох схем обираються з таблиці 3.7:

- активний опір $R1 = 100$ (100 Ом);
- індуктивність $L1 = 5\mu$ (5 мкГн);
- ємність на конденсаторі $C1 = 10\mu$ (10 мкФ);

Таблиця 3.7 – Значення параметрів елементів кола

№ варіанту	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$R1$, Ом	95	90	85	80	95	90	85	80	95	90	85	80	95	90	85
$L1$, мкГн	5	6	5	5	4	3	6	5	6	5	3	6	5	6	5
$C1$, мкФ	10	10	12	12	11	11	9	9	10	10	12	12	11	11	9

3. Для схеми, зображеної на рис. 3.12,а, визначити:

- залежність струму в колі від ємності конденсатора $C1$ в заданому діапазоні зміни;
- кут зсуву фаз напруги на конденсаторі та струму в колі;

- миттєву потужність кола при одному із значень ємності конденсатора.

Побудувати на одному графіку напругу на конденсаторі $C1$, на другому графіку струм на конденсаторі $C1$, на третьому потужність, яка на ньому виділяється. Діапазон зміни ємності конденсатора $C1$: $C1-5\text{мкФ} - C1+5\text{мкФ}$ з кроком $2,5\text{мкФ}$.

4. Для схеми, зображеної на рис. 3.12,б, визначити:

- залежність струму в колі від індуктивності $L1$ в заданому діапазоні зміни;
- кут зсуву фаз напруги на індуктивності та струму в колі;
- миттєву потужність кола при одному із значень індуктивності.

Побудувати на одному графіку напругу на індуктивності $L1$, на другому графіку струм на індуктивності $L1$, на третьому потужність, яка на ній виділяється. Діапазон зміни індуктивності $L1$: $L1 - L1+10\text{мкГн}$ з кроком $2,5\text{мкГн}$.

5. Для схеми, зображеної на рис. 3.12,в, визначити:

- залежність струму в колі від опору $R1$ в заданому діапазоні зміни;
- кут зсуву фаз напруги на опорі та струму в колі;
- миттєву потужність кола при одному із значень опору.

Побудувати на одному графіку напругу на опорі $R1$, на другому графіку струм на опорі $R1$, на третьому потужність, яка на ньому виділяється. Діапазон зміни опору резистора $R1$: $R1 - R1+10\text{ Ом}$ з кроком $2,5\text{ Ом}$.

Питання для самоконтролю

1. Резистор у колі синусоїдального струму.
2. Індуктивність у колі синусоїдального струму.
3. Ємність у колі синусоїдального струму.
4. Які елементи кіл називають реактивними опорами?
5. Як визначаються індуктивний і ємнісний опори?
6. Чому дорівнює зсув фаз між напругою і струмом на індуктивному і ємнісному опорах?
7. Чому дорівнює реактивна потужність і як вона вимірюється?

Перелік рекомендованих джерел

1. Косенков В.Д. Теорія електричних кіл. Навчальний посібник/ В.Д. Косенков, А.С. Кашталъян, В.Д. Бідюк// Хмельницький: ХНУ, 2017. – 255с [с.41-64].
2. Форкун Я. Б. Конспект лекцій з курсу «Теорія електричних та магнітних кіл» / Я. Б. Форкун, М. Л. Глебова: Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, – 2017. – 124 с [с.23-33].

3. Alexander C.K. Fundamentals of Electric Circuits/ Charles K. Alexander, Matthew N.O. Sadiku// New York: McGraw-Hill Education, 2017 – 990p [c.367-424].

Робота №4. Дослідження послідовного та паралельного кіл синусоїдального струму

Мета роботи: Вивчення кіл синусоїдального струму з послідовно та паралельно з'єднаними елементами.

Завдання: Дослідити кола синусоїдального струму з послідовно і паралельно з'єднаними елементами та вплив параметрів схем на кут зсуву фаз між струмом і напругою, експериментально зняти амплітудно- і фазочастотні характеристики контурів, дослідити вплив параметрів резонансних кіл на їх вибірково здатність.

Теоретичні відомості

У колі з послідовним з'єднанням елементів R , L , C (рис. 3.13) може спостерігатись резонанс напруги.

Повний комплексний опір кола

$$\underline{Z} = R + j(X_L - X_C) = R + jX.$$

Зсув фаз $\varphi = 0$, якщо $X = 0$. Таким чином, умова резонансу:

$$X_L = X_C; \quad (4.1)$$

$$\underline{Z} = R. \quad (4.2)$$

З умови (4.1) резонансна частота

$$\omega_p L = \frac{1}{\omega_p C} \Rightarrow \omega_p = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \omega_0, \quad (4.3)$$

тобто при резонансі частота джерела ω_p дорівнює частоті власних коливань контуру ω_0 .

Опір реактивного елементу (L або C) на резонансній частоті називається характеристичним опором контуру

$$\omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C} = \sqrt{\frac{L}{C}} = \rho. \quad (4.4)$$

Згідно з рівнянням

$$\underline{U} = \underline{U}_R + \underline{U}_L + \underline{U}_C$$

на рис. 3.14. побудована векторна діаграма при резонансі.

Відношення напруги на реактивному елементі до напруги джерела при резонансі називають добротністю контуру.

$$Q = \frac{U_L}{U} = \frac{U_C}{U} = \frac{\rho I}{RI} = \frac{\rho}{R}. \quad (4.5)$$

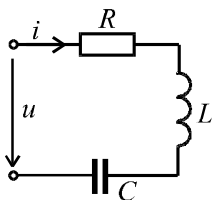


Рисунок 3.13 - Послідовний контур

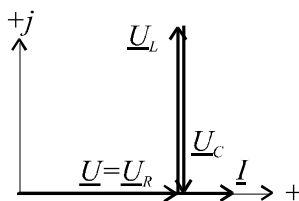


Рисунок 3.14 - Діаграма напруг і струмів

В якісних контурах добротність досягає 100...200 одиниць.

У резонансному режимі обміну енергією між джерелом та контуром немає ($Q_L - Q_C = 0$). Обмін енергією здійснюється тільки між ємністю та індуктивністю. Повна потужність кола дорівнює активній потужності

$$S = P = I^2 R. \quad (4.6)$$

Залежність опорів $X(\omega)$, $Z(\omega)$, (рис. 3.15) та аргументу $\varphi(\omega)$ (рис. 3.16) від частоти називають частотними характеристиками кола.

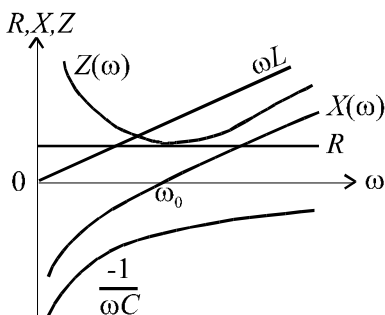


Рисунок 3.15 – Залежність опорів

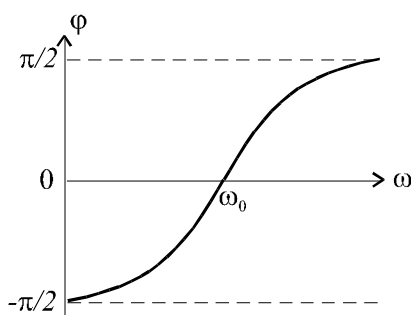


Рисунок 3.16 – Залежність аргументу

Опори $X(\omega)$, $Z(\omega)$ та аргумент $\varphi(\omega)$ визначаються за формулами:

$$X(\omega) = \omega L - \frac{1}{\omega C}; \quad Z(\omega) = \sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}; \quad \varphi(\omega) = \arctg \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}.$$

Крім частотних характеристик будують резонансні криві $I(\omega)$, $U_L(\omega)$, $U_C(\omega)$ (рис. 3.17).

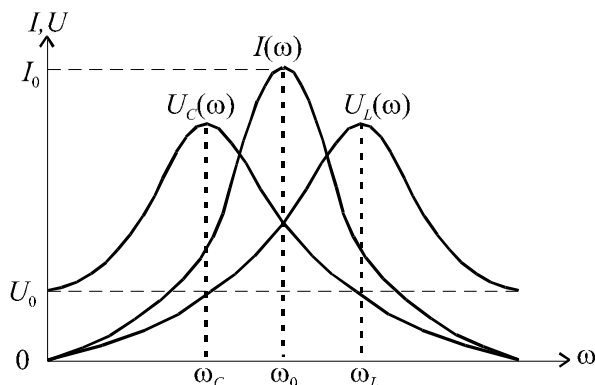


Рисунок 3.17 - Частотні характеристики в послідовному контурі

Для їх побудови використовуються формули:

$$I(\omega) = \frac{U}{Z(\omega)} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}}; \quad U_L(\omega) = I(\omega) \cdot \omega L; \quad U_C(\omega) = I(\omega) \cdot \frac{1}{\omega C}.$$

Частоти ω_L та ω_C , які відповідають максимумам кривих $U_L(\omega)$ та $U_C(\omega)$, визначаються з рівнянь:

$$\frac{dU_L}{d\omega} = 0; \quad \frac{dU_C}{d\omega} = 0.$$

Розглянемо більш детально залежність $I(\omega)$.

Якщо перетворити $I(\omega)$ до вигляду

$$I = \frac{U}{R \sqrt{1 + (\frac{\omega_0 L}{R})^2 \cdot (\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega})^2}} = \frac{I_0}{\sqrt{1 + Q^2 (\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega})^2}} \quad (4.7)$$

і побудувати $I(\omega)$ для різних Q , то побачимо, що при збільшенні добротності крива $I(\omega)$ стає гострішою (рис. 3.18).

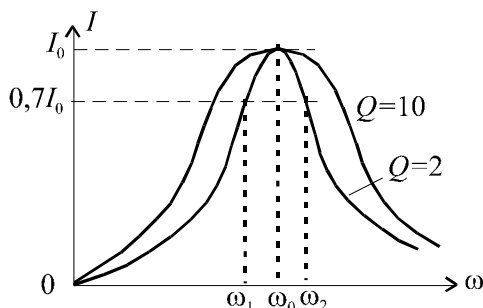


Рисунок 3.18 - Резонансні криві для різних значень добротності

Діапазон частот $\omega_1 \dots \omega_2$, де $\frac{I}{I_0} > \frac{1}{\sqrt{2}}$, називають смугою пропускання контуру. В смузі пропускання опір контуру малий. Отже, чим більша добротність, тим вужча смуга пропускання і кращі вибіркові властивості контуру.

Смуга пропускання пропорційна резонансній частоті і обернено пропорційна добротності

$$\Delta\omega_{0,7} = \omega_2 - \omega_1 = \frac{\omega_0}{Q} = \omega_0 d, \quad (4.8)$$

$$\text{де: } \frac{1}{Q} = d - \text{затухання контуру.} \quad (4.9)$$

При заданій частоті резонанс можна забезпечити, наприклад, зміною ємності. На рис. 3.19. наведена резонансна крива $I(C)$ при $U = \text{const}$ та $f = \text{const}$.

На рис. 3.20. представлено паралельний коливальний контур основного виду, в якому може спостерігатись резонанс струмів.

За умовою резонансу реактивна складова вхідного опору або провідності дорівнює нулю.

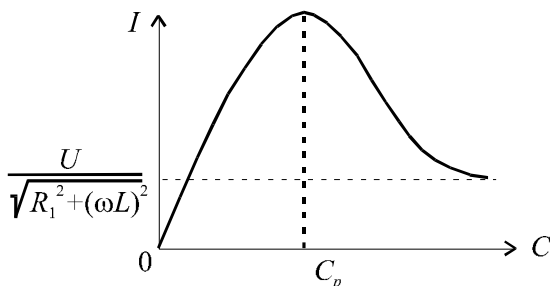
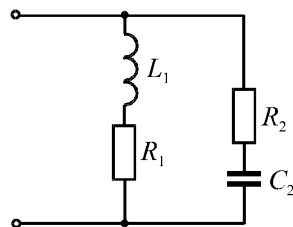
Рисунок 3.19 - Резонансна крива $I(C)$ 

Рисунок 3.20 - Паралельний контур

$$\begin{aligned} \underline{Y} &= \frac{1}{\underline{Z}_1} + \frac{1}{\underline{Z}_2} = \frac{1}{R_1 + jX_L} + \frac{1}{R_2 - jX_C} = \\ &= \left(\frac{R_1}{R_1^2 + X_L^2} + \frac{R_2}{R_2^2 + X_C^2} \right) - j \left(\frac{X_L}{R_1^2 + X_L^2} - \frac{X_C}{R_2^2 + X_C^2} \right) = G - jB, \quad (4.10) \end{aligned}$$

де $G = G_1 + G_2$ – активна провідність кола;

$B = B_L - B_C$ – реактивна провідність кола.

Отже, умовою резонансу є

$$B = 0 \text{ або } B_L - B_C = 0 \quad (4.11)$$

Підставивши всі параметри в (4.11), отримаємо рівняння, яке зв'язує R_1, R_2, L, C, ω при резонансі

$$\frac{\omega L}{R_1^2 + (\omega L)^2} - \frac{1/\omega C}{R_2^2 + (1/\omega C)^2} = 0. \quad (4.12)$$

Резонанс можна забезпечити зміною параметрів або частоти. При цьому розв'язок рівняння (4.12) відносно L або C може мати два дійсних значення, одне або жодного. Розв'язок відносно резонансної частоти має вигляд

$$\omega_p = \frac{1}{\sqrt{LC}} \sqrt{\frac{\frac{L}{C} - R_1^2}{\frac{L}{C} - R_2^2}} = \omega_0 \sqrt{\frac{\rho^2 - R_1^2}{\rho^2 - R_2^2}}. \quad (4.13)$$

Тут слід відмітити, що в реальних контурах $\rho > R_1$ та $\rho > R_2$. В якісних радіотехнічних контурах $\rho \gg R_1$ та $\rho \gg R_2$, тому $\omega_p \approx \omega_0$.

На рис. 3.21 приведена векторна діаграма реального контуру при резонансі.

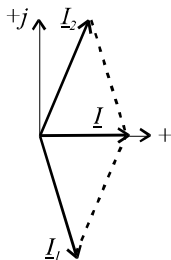


Рисунок 3.21 – Векторна діаграма реального контуру при резонансі

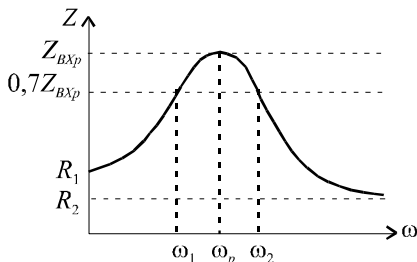


Рисунок 3.22 – Залежність опору при резонансі

Для побудови резонансних кривих $I(\omega)$ та $U(\omega)$ використано частотну характеристику $Z_{BX}(\omega)$. Для отримання аналітичної залежності $Z_{BX}(\omega)$ запишемо комплексний вхідний опір кола

$$\underline{Z}_{BX} = \frac{(R_1 + j\omega L)(R_2 - j\frac{1}{\omega C})}{R_1 + R_2 + j(\omega L - \frac{1}{\omega C})}$$

Модуль цього опору

$$Z_{BX} = \frac{\sqrt{R_1^2 + (\omega L)^2} \cdot \sqrt{R_2^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}}{\sqrt{(R_1 + R_2)^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}} = \sqrt{\frac{(R_1^2 + \omega^2 L^2) \cdot (R_2^2 \omega^2 C^2 + 1)}{(R_1 + R_2)^2 \omega^2 C^2 + (\omega^2 LC - 1)^2}} \quad (4.14)$$

На рис. 3.22 приведена залежність $Z_{BX}(\omega)$, з якої видно, що при резонансі опір має найбільше значення. За цією залежністю можна визначити смугу пропускання контуру. Так, якщо до кола приєднано джерело синусоїдального струму, у якого діюче значення струму $I = const$, а частота може змінюватись, то крива $U(\omega)$ буде повторювати, в іншому масштабі, криву $Z_{BX}(\omega)$.

Якщо до кола приєднано джерело напруги, то резонансна крива струму описується формулою $I(\omega) = U / Z_{BX}(\omega)$. Таку криву показано на рис. 3.23.

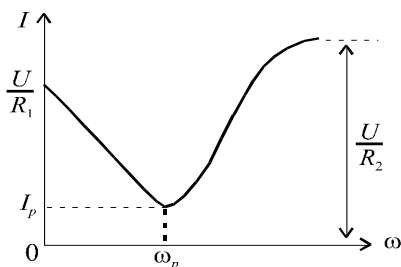
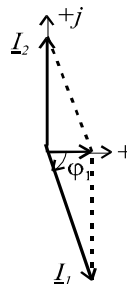
Рисунок 3.23 – Крива $I(\omega)$ 

Рисунок 3.24 – Векторна діаграма

Слід відзначити, що при $R_1 \neq 0$ та $R_2 \neq 0$ мінімальне значення струму кривої $I(\omega)$ не відповідає частоті ω_p , тобто $I_{\min} \neq I_p$, але ця різниця невелика і нею нехтують на практиці при налаштуванні контуру на резонанс.

При $R_2 = 0$ (що дуже близько до реальності) $I_{\min} = I_p$. Векторна діаграма для цього випадку приведена на рис. 3.24, а крива $I(\omega)$ при $\omega \rightarrow \infty$ (рис. 3.23) прямує в нескінченність.

Добротність паралельного контуру – це відношення реактивної складової струму вітки до загального струму при резонансі

$$Q = \frac{I_{1p}}{I} = \frac{I_{2p}}{I}. \quad (4.15)$$

При $R_2=0$ добротність

$$Q = \frac{I_1 \cdot \sin \phi_1}{I_1 \cdot \cos \phi_1} = \operatorname{tg} \phi_1 = \frac{X_L}{R_1}. \quad (4.16)$$

При $R_2=0$ вхідний опір на резонансній частоті визначається як

$$Z_{BX.p} = \frac{U}{I} = \frac{U}{I_1 \cos \phi_1} = \frac{R_1^2 + (\omega_p L)^2}{R_1}, \quad (4.17)$$

а з урахуванням формули (4.13) отримаємо

$$Z_{BX.p} = \frac{L}{C \cdot R_1} = \frac{\rho^2}{R_1} = \rho \cdot Q. \quad (4.18)$$

Тобто, вхідний опір при резонансі більше характеристичного опору в Q разів.

Якщо резонанс досягається зміною ємності (при $R_2 = 0$), то така залежність $I(C)$ має вигляд (рис. 3.25).

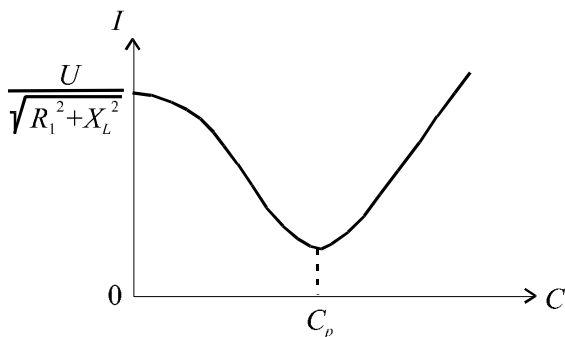


Рисунок 3.25 - Резонансна крива $I(C)$

Порядок виконання роботи

1. Зібрати електричне коло, зображене на рис. 3.26.

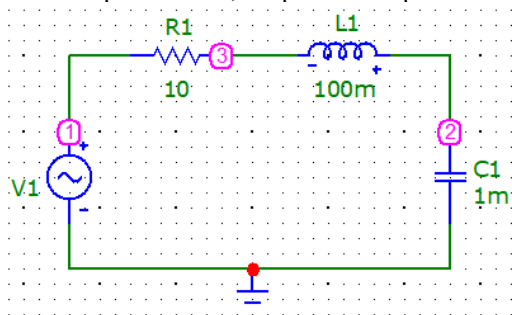


Рисунок 3.26 - Схема послідовного RLC -кола

Схема складається з послідовно ввімкнених джерела синусоїдального ЕРС з амплітудою сигналу 5 В та частотою 50 Гц, резистора, котушки індуктивності та конденсатора. Початкові значення параметрів елементів:

- ємність конденсатора $C1 = 1m$ (1 мФ);
- індуктивність $L1 = 100m$ (100 мГн);

- активний опір $R1 = 10$ (10 Ом).

2. Визначити вплив параметрів пасивних елементів. Діапазон зміни активного опору $R1$: 5 – 15 Ом з кроком 2,5 Ом. Діапазон зміни індуктивності $L1$: 90 – 110 мГн з кроком 5 мГн. Діапазон зміни ємності конденсатора $C1$: 0,5 – 1,5 мФ з кроком 0,25 мФ.

3. Побудувати на одному графіку залежності напруги на опорі $R1$ від струму на $R1$, на другому графіку - струм через опір $R1$ та напругу на індуктивності $L1$, на третьому – струм через опір $R1$ та напругу на ємності $C1$.

3.1 Дослідити резонансні криві контуру, для чого вибрати АС-аналіз, встановити межі і визначити величини, які будуть виведені. Це $V(1)$ – напруга джерела;

$V(3,1)$ – напруга на резисторі $R1$;

$V(2,3)$ – напруга на індуктивності $L1$;

$V(2)$ – напруга на ємності $C1$;

$Ph(V(3,1))$ – різниця фаз між струмом у контурі і напругою джерела. Розмах частот для розрахунку встановимо від 1 до 30 Гц. Результати аналізу будуть мати наступний вигляд (рис. 3.27).

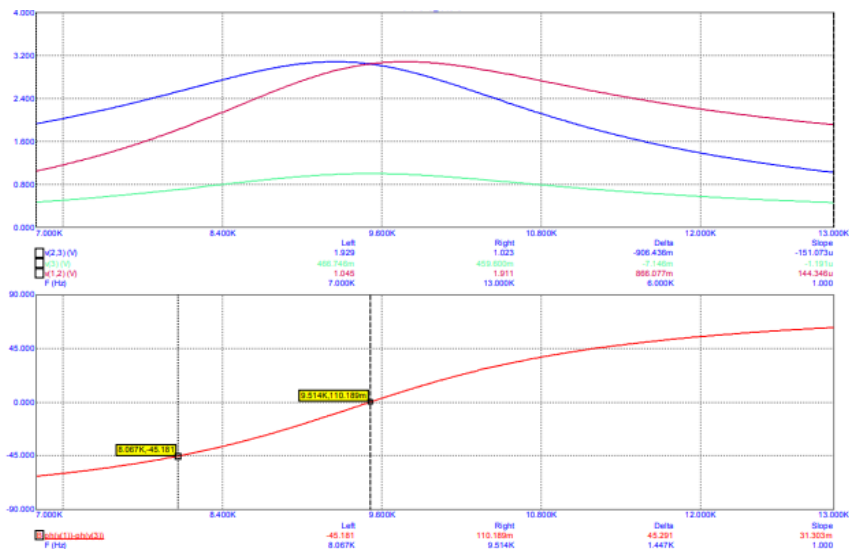


Рисунок 3.27 - Вікно програми з результатами аналізу

3.7. Встановити напругу джерела $V1=10V$ при частоті f_0 , при якій в пункті був найбільший струм і зняти залежність струму I від величини ємності. Результати занести в табл. 3.10.

Таблиця 3.10 – Результати вимірювань значень сили струму

$C, \text{ мкФ}$							
$I, \text{ мА}$							

4. Зібрати електричне коло, зображене на рис. 3.28.

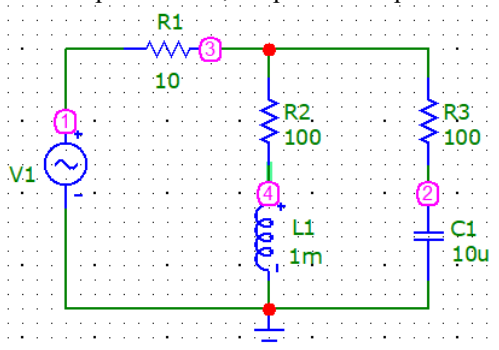


Рисунок 3.28 - Схема паралельного контуру

Дана схема складається з послідовно ввімкнених джерела синусоїдальної ЕРС з амплітудою сигналу 5 В та частотою 50 Гц, резистора $R1$ з опором 0,1 Ом. Послідовно з ними в коло ввімкнені дві паралельні вітки: котушка індуктивності $L1$ з активним опором $R2$ та конденсатор $C1$ з активним опором $R3$. Початкові значення:

- активний опір $R2 = 100$ (100 Ом);
- індуктивність $L1 = 1\text{m}$ (1 мГн);
- активний опір $R3 = 100$ (100 Ом);
- ємність на конденсаторі $C1 = 10\text{u}$ (10 мФ).

5. Визначити вплив параметрів пасивних елементів на кут зсуву фаз між струмом і напругою. Активні опори залишаються незмінними. Діапазон зміни індуктивності $L1$: 10m – 150m з кроком 20m. Діапазон зміни ємності конденсатора $C1$: 10u – 30u з кроком 2,5u.

Побудувати на одному графіку напругу на джерелі $V1$, на другому графіку струм на опорі $R1$, на третьому струму на опорах $R1$, $R2$ та $R3$.

I_K , mA									
I_C , mA									

Вимоги до звіту. Звіт повинен містити: назву роботи, завдання, відомості про послідовність виконання роботи, схеми дослідів, результати обчислень, відповідні схеми та графіки.

Питання для самоконтролю

1. Аналіз кола синусоїдного струму з послідовним з'єднанням елементів.
2. Аналіз кола синусоїдного струму з паралельним з'єднанням елементів.
3. Методика розрахунку кін синусоїдного струму символічним методом.
4. Послідовний резонансний контур. Умова резонансу, резонансна частота, добротність. Векторна діаграма при резонансі.
5. Резонансна крива струму послідовного коливального контуру. Смуга пропускання.
6. Паралельний коливальний контур. Умови резонансу. Векторна діаграма при резонансі.

Перелік рекомендованих джерел

1. Косенков В.Д. Теорія електричних кіл. Навчальний посібник/ В.Д. Косенков, А.С. Кашталъян, В.Д. Бідюк// Хмельницький: ХНУ, 2017. – 255с [с.64-84].
2. Форкун Я. Б. Конспект лекцій з курсу «Теорія електричних та магнітних кіл» / Я. Б. Форкун, М. Л. Глебова: Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, – 2017. – 124 с [с.33-45].
3. Alexander С.К. Fundamentals of Electric Circuits/ Charles K. Alexander, Matthew N.O. Sadiku// New York: McGraw-Hill Education, 2017 – 990p [с.455-486].

Лабораторна робота №5 Дослідження трифазного кола

Мета роботи: Вивчення трифазних кіл та способів з'єднання трифазних приймачів.

Завдання: Познайомитись з двома способами з'єднання трифазних приймачів. Навчитись вимірювати фазні та лінійні струми та напруги, засвоїти співвідношення між ними. Познайомитись з можливими наслідками несиметрії навантаження, викликаної аварією.

Вимоги до звіту. Звіт повинен містити: назву роботи, завдання, відомості про послідовність виконання роботи, схеми дослідів, результати обчислень, відповідні схеми та графіки.

Теоретичні відомості

Трифазним струмом називається сукупність трьох однофазних змінних струмів однакової частоти, зсунутих один щодо одного на $1/3$ періоду, тобто на 120° . Якщо в трифазній системі діють електрорушійні сили E_A, E_B, E_C , які однакові за величиною і зсунуті по фазі на 120° , а повні опори всіх трьох фаз як за величиною, так і за характером є однаковими, то такий режим називається симетричним. У колах трифазного струму джерела живлення (обмотки генератора електроенергії) і споживачі можуть з'єднуватися «зіркою» або «трикутником».

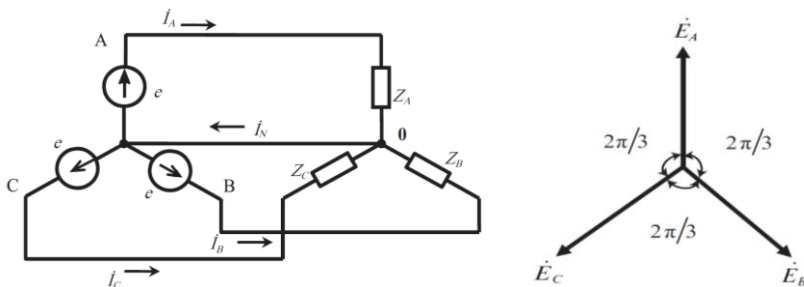


Рисунок 3.29 - З'єднання зіркою та діаграма фазних напруг

При з'єднанні «зіркою» загальні точки, які називають нульовими, з'єднують між собою, а провідник (0-0₁), який їх з'єднує, називається нейтраллю (3.29). Така система електрозабезпечення називається чотирихпровідною. Кожен споживач фактично живиться від свого джерела, який називається фазним, а відповідні провідники живлення називаються фазами. Ця система електроживлення має високу надійність, оскільки при обриві будь-якої з фаз інші споживачі отримуватимуть електроенергію. За такою схемою забезпечується живлення однофазних споживачів, наприклад:

освітлювальних приладів, житлових будинків і квартир, низки нагрівальних приладів тощо. При такій формі з'єднання у будь-який момент часу

$$\sum_{i=1}^3 e_i = e_A + e_B + e_C = 0$$

При симетричному навантаженні, тобто коли $Z_A = Z_B = Z_C$, для струмів, які протікають по фазним провідникам I_A, I_B, I_C також буде виконуватись умова

$$\sum_{i=1}^3 I_i = I_A + I_B + I_C = 0.$$

При цьому фазні струми на векторній діаграмі (рис. 3.30) також будуть зображуватися у вигляді симетричної системи векторів, зсунутих щодо відповідних ЕРС на кут φ .

Таким чином, при симетричному навантаженні струм через нейтральний провід $I_N = 0$. У цьому випадку нейтральний провід стає зайвим і його можна не використовувати. Це буде трипровідна трифазна система. Для трипровідної системи завжди виконується співвідношення $I_A + I_B + I_C = 0$ незалежно від величини і характеру споживачів.

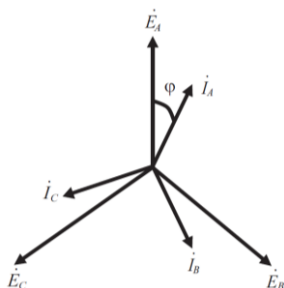


Рис. 3.30. Діаграма напруг і струмів в трипровідній системі

За умови, що опори провідників є набагато меншими опорів фаз Z , можна вважати, що $E_\phi = U_\phi$.

Напруги між фазами і відповідні струми називаються лінійними напругами і струмами. При з'єднанні «зіркою» $I_l = I_\phi$, а з трикутника опорів маємо $U_l = \sqrt{3} \cdot U_\phi$.

Комплексні значення фазних струмів можуть бути визначені за формулами:

$$\underline{I}_A = \underline{U}_A / \underline{Z}_A, \quad \underline{I}_B = \underline{U}_B / \underline{Z}_B, \quad \underline{I}_C = \underline{U}_C / \underline{Z}_C.$$

Зазначена вище позитивна властивість чотирьохпровідної мережі має і свої недоліки, які іноді позначаються на практиці. Якщо при несиметричному навантаженні, з'єднаному в «зірку», нейтральний провід буде обірваний, то між нейтральними точками джерел і споживачів з'явиться напруга між нейтральними або по іншому – відбувається зміщення нейтралі приймачів. Через зсув нейтралі порушується симетрія фазної напруги на приймачі, що призводить до його ненормальної роботи. Напруга може бути визначена методом вузлових потенціалів:

$$\underline{U}_{NN_1} = \frac{\underline{Y}_A \underline{E}_A + \underline{Y}_B \underline{E}_B + \underline{Y}_C \underline{E}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C},$$

де $\underline{Y}_A, \underline{Y}_B, \underline{Y}_C$ - комплексні провідності фаз навантаження.

В результаті фазні напруги споживача будуть визначатися за формулами

$$\underline{U}_A = \underline{E}_A - \underline{U}_{NN_1}, \quad \underline{U}_B = \underline{E}_B - \underline{U}_{NN_1}, \quad \underline{U}_C = \underline{E}_C - \underline{U}_{NN_1}.$$

Як наслідок, може виникнути значна асиметрія фазних напруг. Якщо роз'єднання нейтрального проводу має аварійний характер, то напруги окремих фаз можуть значно перевищити номінальні значення, піднявшись до рівнів, які є неприпустимими для споживачів.

Вектори фазних напруг можна визначити графічно, побудувавши топографічну діаграму фазної напруги генератора і \underline{U}_{NN_1}

Другий спосіб з'єднання споживачів - «трикутник» (рис. 3.31). Цей спосіб виключає використання нейтрального провідника, тому схема живлення називається трипровідною трифазною. В таку схему живлення можна вмикати лише симетричні споживачі, наприклад електричні двигуни.

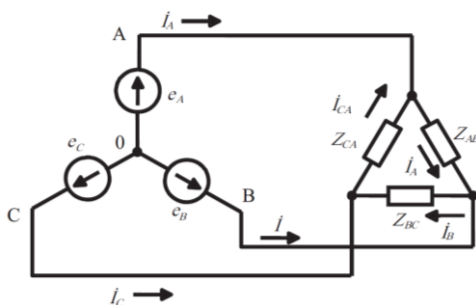


Рисунок 3.31 - Приєднання споживача зіркою

При з'єднанні споживачів енергії в «трикутник» опори Z_{AB} , Z_{BC} , Z_{CA} приєднуються між двома лінійними провідниками. Тому фазні напруги споживачів, тобто напруги на опорах, дорівнюють лінійним напругам трифазного джерела, що ілюструється векторною діаграмою (рис. 3.32). Струми у фазах споживача визначаються виразами:

$$I_A = U_A / Z_A, \quad I_B = U_B / Z_B, \quad I_C = U_C / Z_C.$$

Лінійні струми визначаються як різниця фазних струмів:

$$I_A = I_{AB} - I_{CA}, \quad I_B = I_{BC} - I_{AB}, \quad I_C = I_{CA} - I_{AB}.$$

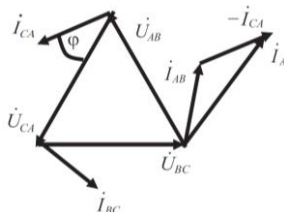


Рисунок 3.32 - Діаграма напруг і струмів при з'єднанні трикутником

З векторних діаграм і з наведених формул випливає, що при симетричній системі ЕРС і симетричному навантаженні між лінійним і фазними струмами буде справедливим співвідношення $I_L = \sqrt{3}I_\phi$.

Забезпечити симетричне навантаження в реальних системах неможливо. Схема може бути несиметричною в результаті неоднакових опорів фаз, короткого замикання фаз, обриву фази.

При несиметричного навантаження і з'єднанні споживачів «зіркою» сила струму в нульовому проводі не дорівнює нулю. Миттєва потужність, яка віддається трифазним джерелом ЕРС, визначається сумою миттєвих потужностей кожної з фаз:

$$s = s_A + s_B + s_C = u_A i_A + u_B i_B + u_C i_C$$

Для середніх значень активної і реактивної потужностей

$$P = P_A + P_B + P_C = 3U_\phi I_\phi \cos \varphi = \sqrt{3}U_L I_L \cos \varphi,$$

$$Q = Q_A + Q_B + Q_C = 3U_\phi I_\phi \sin \varphi = \sqrt{3}U_L I_L \sin \varphi.$$

Повна потужність

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

Порядок виконання роботи

1. Дослідження симетричних електричних кіл трифазного струму.

1.1. Скласти симетричну схему трифазного кола при частоті $f=50$ Гц (рис. 3.33.) з джерелами згідно варіанту у таблиці 3.15, які увімкнені за схемою «зірка».

Таблиця 3.15. Варіанти завдань

№ вар-та	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$U_L, \text{В}$	380	220	127	380	220	127	380	220	127	380	220	127	380	220	127
$R_A, \text{Ом}$	8	10	12	14	16	8	10	12	14	16	8	10	12	14	16
$R_B, \text{Ом}$	8	10	12	14	16	8	10	12	14	16	8	10	12	14	16
$R_C, \text{Ом}$	8	10	12	14	16	8	10	12	14	16	8	10	12	14	16
$\cos\varphi$	0,9	0,85	0,8	0,75	0,7	0,65	0,9	0,85	0,8	0,75	0,7	0,65	0,9	0,85	0,8

Виміряти лінійні напруги між кожною парою фаз (U_{AB} , U_{BC} , U_{CA}), а також фазові зсуви між напругами U_A і U_{AB} , U_B і U_{BC} , U_C і U_{CA} .

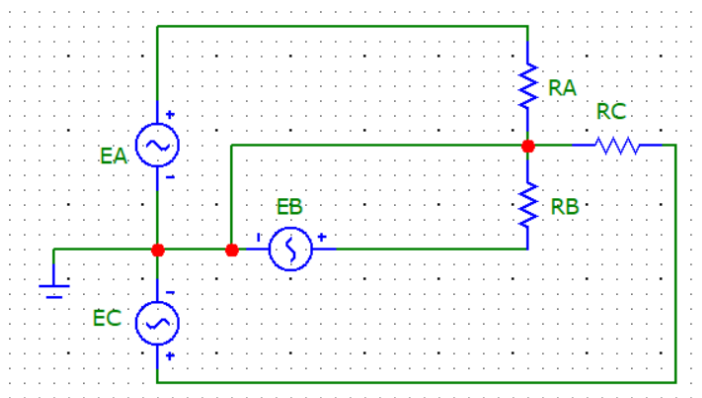


Рисунок 3.33 - Схема з'єднання зіркою

1.2. Створити трифазне навантаження з опорами згідно варіанту, з'єднати їх «зіркою» і приєднати до відповідних фаз трифазного джерела живлення. Виміряти струми в кожній фазі навантаження, фазні кути між відповідними фазними напругами і струмами.

1.3. Для $\cos\varphi$, який був обраний відповідно до варіанту, обчислити реактивний опір, а потім індуктивностям L_A , L_B , L_C для заданої частоти, виходячи з залежності $X_L = 2\pi fL$. Розраховані таким чином індуктивності увімкнуті в схему послідовно з опорами R_A , R_B , R_C (рис 3.34).

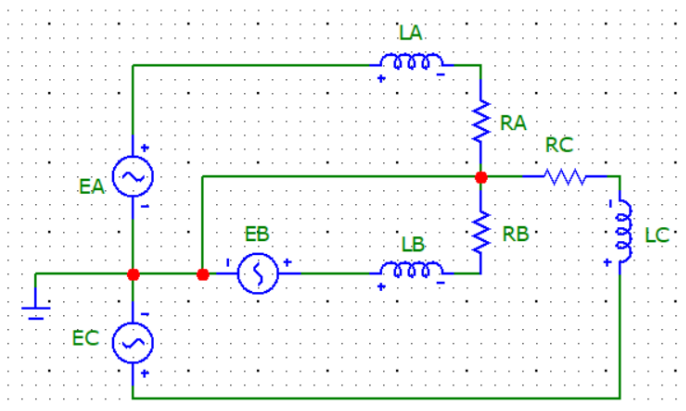


Рисунок 3.34 - Схема з'єднання зіркою

1.4. Виміряти фазні кути між фазними напругами і струмами. Встановити відповідність між експериментальними і розрахунковими даними.

1.5. Вузол N з'єднати з вузлом n через амперметр. Пояснити показання амперметра.

1.6. Запропонувати схему обчислення потужності в навантаженні: в одній фазі; в трьох фазах. Привести схему для вимірювання: активної складової потужності; повної потужності. Порівняти виміряні значення з розрахунковими даними.

1.7. «Зірку» опорів, згідно з правилами еквівалентного перетворення «зірки» на «трикутник», перетворити в «трикутник» опорів і зібрати схему, яка наведена на рис. 3.35. Виміряти лінійні струми в кожній з фаз та струми міжфазного навантаження за допомогою амперметра. Обчислити співвідношення між фазними і лінійними напругами. Порівняти з розрахунковими даними.

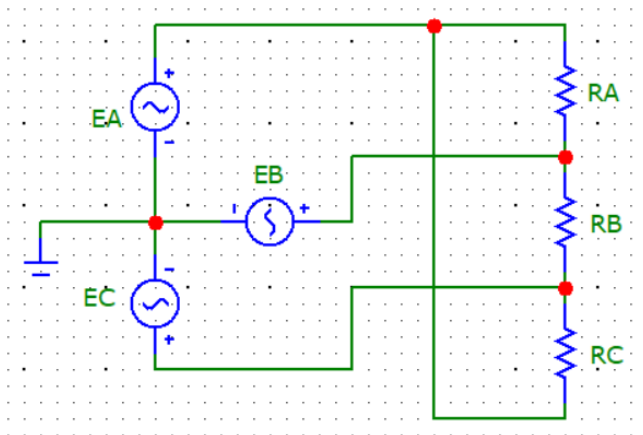


Рисунок 3.35 - Схема з'єднання трикутником

1.8. Зробити висновки про роботу симетричної трифазної мережі в різних режимах.

2. Дослідження несиметричних електричних кіл трифазного струму

2.1. Скласти схему трифазної мережі з джерелами відповідно до варіанту, які з'єднані «зіркою» (таблиця 3.15). Виміряти лінійні напруги між кожною парою фаз (U_{AB} , U_{BC} , U_{CA}). Скласти несиметричну схему навантаження шляхом збільшення опору навантаження однієї фази в 10 разів. Знову виміряти струми і напруги. Від'єднати нульовий провід і виміряти струми і напруги. Порівняти отримані в досліді результати і зробити висновки.

2.2. Задати внутрішній опір джерела трифазної напруги. Величина активного опору при номінальних струмах повинна створювати падіння напруги на лінії передачі електроенергії, яка не перевищує 5% від ЕРС. Для цього необхідно, щоб внутрішній опір джерела R був набагато меншим за опір навантаження кожної фази $R = 0,05 R_n$.

2.3. Для трифазного джерела скласти несиметричну схему навантаження з активними опорами. Для того щоб мати можливість приєднати нульовий провід, джерело встановлюється в режим «зірка з заземленою нейтраллю», а для проведення експерименту з обіраним нульовим проводом - в режим «зірка». Навантаження з'єднати в «зірку» (рис. 3.33). Виконати досліди з вимірювання напруги і струмів в колі з несиметричним навантаженням.

Перший дослід виконати із заземленим через амперметр вузлом n при співвідношенні опорів $R_A : R_B : R_C$, як 1,0 : 0,8 : 1,2. Виміряти струми і напруги кожної з фаз (I_A , U_A ; I_B , U_B ; I_C , U_C); лінійні напруги U_{AB} , U_{BC} , U_{CA}

(встановити в схему відповідні прилади), а також струм нульового провідника I_0 . Визначити кути зсуву між лінійними напругами. Дослід повторити з розірваним провідником $N-n$.

Другий дослід проводити аналогічно, але з опорами, які мають велику несиметричність навантаження, збільшивши опір R_C у 10 разів. Дослід також провести при наявності та відсутності провідника $N-n$.

Третій дослід виконується при опорах, однакових за модулем, але різних за характером – активному R , індуктивному X_L , ємнісному X_C .

Четвертий дослід проводиться при обірваному навантаженні однієї з фаз і симетричних навантаженнях двох інших фаз. Також треба виміряти струми і напруги кожної з фаз ($I_A, U_A; I_B, U_B; I_C, U_C$); лінійні напруги U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} ; струм нульового провідника I_0 . Дослід проводиться при наявності та відсутності провідника $N-n$.

П'ятий дослід (рис. 3.36) проводиться при симетричному навантаженні двох фаз і короткому замиканні третьої фази C . Провести досліди з нульовим проводом $N-n$ і без нього.

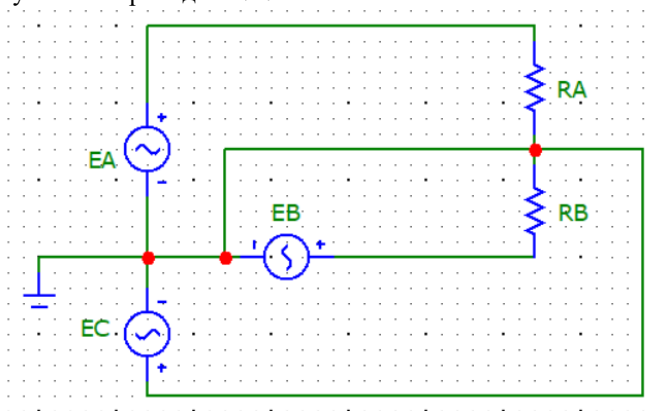


Рисунок 3.36 - Електрична схема для дослідів

2.4. Провести досліди зі з'єднання навантаження в «трикутник». До трифазного джерела приєднати навантаження у вигляді «трикутника». Виконати перерахунок опорів «зірки» в «трикутник».

Перший дослід провести при співвідношенні опорів $R_{AB} : R_{BC} : R_{CA}$, як $1,0 : 0,8 : 1,2$. Виміряти лінійні струми I_{AB}, I_{BC}, I_{CA} і напруги U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} .

Другий дослід повторює перший, але співвідношення опорів – $1,0 : 0,5 : 1,5$. Виконуються ті ж заміри.

Третій дослід провести при $R_{AB} = R_{CA}$ і обірваному навантаженні $R_{BC} = 0$. Виконуються ті ж заміри.

Четвертий дослід провести при опорах $R_{AB} = R_{CA}$ і $R_{BC} = 0$. Виконуються ті ж заміри.

П'ятий дослід провести з навантаженнями R , X_L , X_C (опори мають бути однаковими за модулем). Виконуються ті ж заміри.

2.5. Зробити висновок про роботу несиметричної трифазної мережі у різних системах.

Питання для самоконтролю.

1. Що таке симетричний і несиметричний режими роботи трифазного кола ?
2. Якими співвідношеннями характеризуються лінійні і фазні напруги та струми при з'єднанні зіркою і трикутником ?
3. Які переваги і недоліки чотирипровідної системи ? В яких випадках застосовують трипровідні кола, з'єднані зіркою ?
4. Як зміняться напруги та струми в симетричній трифазній системі при обриві однієї з фаз ?
5. Як зміняться напруги та струми в симетричній трифазній системі при закороченні однієї з фаз ?
6. Як зміняться напруги та струми в несиметричній трифазній системі при обриві нейтралі ?

Перелік рекомендованих джерел

1. Форкун Я. Б. Конспект лекцій з курсу «Теорія електричних та магнітних кіл» / Я. Б. Форкун, М. Л. Глебова: Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, – 2017. – 124 с [с.46-54].
2. Alexander С.К. Fundamentals of Electric Circuits/ Charles K. Alexander, Matthew N.O. Sadiku// New York: McGraw-Hill Education, 2017 – 990p [с.501-552].

3 ЛІТЕРАТУРА

3.1. Основна література.

1. Косенков В.Д. Теорія електричних кіл. Навчальний посібник/ В.Д. Косенков, А.С. Каштальян, В.Д. Бідюк// Хмельницький: ХНУ, 2017. – 255с.
2. Форкун Я. Б. Конспект лекцій з курсу «Теорія електричних та магнітних кіл» / Я. Б. Форкун, М. Л. Глебова: Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, – 2017. – 124 с
3. Alexander С.К. Fundamentals of Electric Circuits/ Charles K. Alexander, Matthew N.O. Sadiku// New York: McGraw-Hill Education, 2017 – 990р.

3.1. Додаткова література.

1. Дейбук В.Г. Теорія електричних кіл для системотехніків: навч. посібник/ В.Г. Гейдук// Чернівці: Чернівецький нац. ун-т, 2011. – 320с.
2. Косенков В.Д. Практикум з теорії лінійних електричних кіл: навч. посібник, 2-е вид., випр. і доповн./ В.Д. Косенков, Л.В. Пастернак// Хмельницький: ХНУ, 2008. – 199с.