

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

ЛІНІЙНІ ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА ПЕРІОДИЧНОГО ЗМІННОГО СТРУМУ: УСТАЛЕНІ ТА ПЕРЕХІДНІ РЕЖИМИ ПРАКТИКУМ

Навчальний посібник

Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра
за освітніми програмами «Електротехнічні пристрої та електротехнологічні комплекси»,
«Нетрадиційні та відновлювальні джерела енергії», «Електричні станції»,
«Електромеханічні системи автоматизації та електропривод», «Електричні машини і
апарати», «Електричні системи і мережі», «Управління, захист та автоматизація
енергосистем»
спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Електронне мережне навчальне видання

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2022

Автори: Бурик, М. П., канд. техн. наук
Спінул, Л. Ю., канд. техн. наук, доц.
Лободзинський В. Ю., канд. техн. наук
Бурик, І. П., канд. фіз.-мат. наук, доц.

Рецензент Пушкар, М. В., канд. техн. наук, доц.,
кафедра автоматизації електромеханічних систем та
електроприводу, ФЕА

Відповідальний редактор Бурик, М. П., канд. техн. наук

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
(протокол № 3 від 01.12.2022 р.)
за поданням Вченої ради факультету/навчально-наукового інституту
(протокол № 3 від 26.09.2022 р.)*

Представлено основні положення для аналізу трифазних кіл при з'єднанні споживачів за схемами «зірка» чи «трикутник», лінійного кола з несинусоїдною ЕРС та чотириполюсника. Наведено приклади побудови векторної діаграми струмів та напруг. Розглянуто перехідні процеси у лінійних колах постійного та змінного струмів за допомогою класичного та операторного методів.

Призначений для студентів денної та заочної форм навчання спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

Реєстр. № НП 22/23-142. Обсяг 8,5 авт. арк.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
проспект Перемоги, 37, м. Київ, 03056
<https://kpi.ua>

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру видавців, виготовлювачів
і розповсюджувачів видавничої продукції ДК № 5354 від 25.05.2017 р.

© М. П. Бурик, Л. Ю. Спінул, В. Ю. Лободзинський
© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022

ЗМІСТ

	стор.
Вступ.....	6
Основні положення.....	8
1 Правила виконання електричних схем.....	9
1.1 Загальні вимоги до виконання електричних схем.....	11
2 РОЗДІЛ 1 ЛІНІЙНІ ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА ПЕРІОДИЧНОГО ЗМІННОГО СТРУМУ	15
2.1 Практичне заняття №1 Розрахунок трифазного симетричного кола.....	15
2.2 Практичне заняття №2 Розрахунок несиметричного трифазного кола при з'єднанні споживачів зіркою чи трикутником.....	45
2.3 Практичне заняття №3 Розрахунок лінійного електричного кола з несинусоїдною ЕРС.....	72
2.4 Практичне заняття №4 Визначення коефіцієнтів рівнянь 4- полюсника різних форм запису.....	105
3 РОЗДІЛ 2 РОЗРАХУНОК ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ В ЛІНІЙНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ КОЛАХ	129
3.1 Практичне заняття №5 Розрахунок перехідного процесу у колі з одним накопичувачем енергії при дії постійних та синусоїдних джерел енергії.....	129
3.2 Практичне заняття №6 Розрахунок перехідного процесу у колі з двома накопичувачами енергії при дії постійних синусоїдних джерел енергії	143
3.3 Практичне заняття №7 Класичний метод розрахунку перехідного процесу в RLC колі енергії при дії постійних джерел енергії.....	151
3.4 Практичне заняття №8 Операторний метод розрахунку перехідного процесу в електричному колі з двома накопичувачами енергії.....	168
Бібліографічний список використаної літератури.....	183
Додаток А Зразки завдань до модульної контрольної роботи (І частина)	184
Додаток В Зразки завдань до модульної контрольної роботи (ІІ частина).....	186

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ДСТУ – державного стандарту України

ЕРС – електрорушійна сила

ЄСКД – єдина система конструкторської документації

УГЗ – умовне графічне зображення

УГП – умовне графічне позначення

a – поворотний множник ($a = e^{j120^\circ}$, $a^2 = e^{-j120^\circ}$)

B – реактивна провідність

C – ємність конденсатора

E – ідеальне джерело ЕРС (діюче значення ЕРС)

\underline{E} – комплексне значення ЕРС

f – лінійна частота синусоїдного сигналу

G – активна провідність

I – електричний струм (діюче значення)

\underline{I} – комплексне значення сили струму

$j = \sqrt{-1}$ – уявна одиниця

L – індуктивність котушки

P – активний потужність

$PA(A)$ – амперметр

$PV(V)$ – вольтметр

$PW(W)$ – ватметр

Q – реактивна потужність або комутуючий ключ

R – активний опір

S – повна потужність

\underline{S} – комплекс повний потужності

T – потужність спотворення

t – час

$t_{\text{пн}}$ – час перехідного процесу ($t_{\text{пн}} = (3 \div 5)\tau$)

U – електрична напруга (діюче значення)

\underline{U} – комплекс електричної напруги

X – реактивний опір

X_L – реактивний опір індуктивної котушки

X_C – реактивний опір конденсатора

Z – повний опір

\underline{Z} – комплексний повний опір

λ – коефіцієнт потужності

β – коефіцієнт фази

α – коефіцієнт згасання

λ – коефіцієнт потужності

τ – стала перехідного процесу

φ – потенціал електричного поля (початкова фаза синусоїдної функції)

ψ – початкова фаза

ω – кутова частота ($\omega = 2\pi f$)

ВСТУП

«Теоретичні основи електротехніки - 2» є освітньою компонентою, яка являється основною базовою в підготовці здобувачів ступеня бакалавра за освітніми програмами «Електротехнічні пристрої та електротехнологічні комплекси», «Нетрадиційні та відновлювальні джерела енергії», «Електричні станції», «Електромеханічні системи автоматизації та електропривод», «Електричні машини і апарати», «Електричні системи і мережі», «Управління, захист та автоматизація енергосистем» спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

Засвоєння освітньої компоненти "Теоретичні основи електротехніки -2" неможливе без отримання практичного навичок та досвіду, які отримує здобувач під час рішення практичних задач (аналізу електричних кіл постійного та змінного струму) та побудови векторних діаграм струмів (напруг) і перехідних процесів координат електричних кіл.

Мета навчального посібника (практикуму) полягає у самостійному засвоєнні студентами основ теорії лінійних кіл періодичного змінного струму та перехідних процесів у лінійних електричних колах за допомогою законів Кірхгофа та Ома, еквівалентних перетворень у лінійних колах, методів контурних струмів, вузлових потенціалів, символічного (комплексного) методу, векторних діаграм, розкладання періодичних несинусоїдних функцій (ЕРС, напруг та струмів) в тригонометричний ряд Фур'є, основних рівнянь чотириполюсника, I та II - го законів комутації, класичного та операторного методів розрахунку перехідних процесів складних кіл і ознайомленням з загальними правилами виконання електричних схем відповідно до єдиної системи конструкторської документації та державного стандарту України (ЄСКД).

У навчальному посібнику представлено аналіз трифазного симетричного кола, несиметричного трифазного кола при з'єднанні споживачів за схемами «зірка» чи «трикутник» та лінійного електричного

кола з несинусоїдною ЕРС. Також виконано визначення коефіцієнтів рівнянь 4-полюсника різних форм запису. Наведено розрахунок перехідного процесу у колі з одним накопичувачем енергії при дії постійних та синусоїдних джерел енергії, у колі з двома накопичувачами енергії при дії постійних синусоїдних джерел енергії. Представлено дослідження перехідних процесів у лінійних RLC колах (кола з двома накопичувачами енергії) при дії постійних джерел енергії класичним та операторними методами.

Достовірність розрахованих струмів та напруг у електричних схемах перевірено за допомогою складання балансу активних, реактивних потужностей електричного кола та побудованих векторних діаграм (струмів та напруг) й графіків перехідних процесів лінійних електричних кіл.

Для кращого засвоєння наведеного теоретичного матеріалу крім завдань для самостійної роботи представлено вирішені задачі для складних електричних кіл періодичного змінного та постійного струмів.

Номер варіанта самостійної задачі за відповідною темою практичного заняття для студента задає викладач, який проводить практичні заняття.

Навчальний посібник призначений для студентів денної та заочної форм навчання, які вивчають освітню компоненту "Теоретичні основи електротехніки - 2".

ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ

В освітній компоненті «Теоретичні основи електротехніки - 2» розглядаються лінійні електричні кола, тому електричні схеми складаються із ідеалізованих пасивних (резистивний, індуктивний та ємнісний елементи, які є споживачами енергії) та активних елементів (джерела струму та напруги, що генерують енергію). Вони відображують одну із сторін фізичних явищ у реальних електричних колах [1].

Резистивний елемент характеризує незворотне перетворення електромагнітної енергії в тепло, а накопичення енергії в електричному та магнітному полях відсутнє. Параметром резистивного елемента є активний опір R (Ом).

Індуктивний елемент електричного кола характеризує магнітне поле, яке створюється електричним струмом. У ньому відбувається тільки накопичування магнітної енергії, що пов'язане з протіканням електричного струму, втрати та накопичування електричної енергії відсутні. Його основною кількісною мірою є індуктивність (коефіцієнт самоіндукції) L (Гн).

Ємнісний елемент характеризує електричну енергію, що може накопичуватись в елементі, втрати та накопичування магнітної енергії відсутні. Коефіцієнтом пропорційності між зарядом та напругою виступає електрична ємність C (Ф) [2].

Параметри лінійних елементів R, L, C не залежать від величини струму та напруги на них, а також від їх напрямку. Характеристики лінійних елементів являються прямими лініями ($u = Ri, \psi = Li, q = Cu$). У пасивних (лінійних) елементів струм та напруга пов'язані відповідними співвідношеннями:

$$u_R = Ri, u_L = -e_L = L \frac{di}{dt}, u_C = \frac{1}{C} \int i dt + u_C(0);$$

$$i_R = \frac{u_R}{R}, i_L = \frac{1}{L} \int u_L dt + i_L(0), i_C = C \frac{du_C}{dt}.$$

У джерелах ЕРС $e(t)$ та струму $j(t)$ під дією сторонніх сил неелектричної природи виникає поділ зарядів різних знаків, що приводить до появи напруги на затискачах джерела ЕРС або струму у колі з джерелом струму.

Миттєва потужність на будь-якого елементу дорівнює $p(t) = u(t) \cdot i(t)$ [1].

1 ПРАВИЛА ВИКОНАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ СХЕМ [3]

ЄСКД призначена для встановлення в організаціях та на підприємствах єдиних правил виконання, оформлення та обертання конструкторської документації. Отже *елементи електричного кола зображують на схемах у вигляді умовних графічних зображень (УГЗ) відповідно до правил ЄСКД та ДСТУ*, згідно яких:

- *схема* – це конструкторський документ, на якому представлені у вигляді УГЗ або позначень (УГП) складові частини виробу та зв'язки між ними;

- *елемент схеми* – це складова частина схеми, яка виконує певну функцію у виробі та не може бути розділена на частини, має самостійне призначення та власне графічне та літерно-цифрове позначення;

- *лінія взаємозв'язку* – відрізок лінії, який показує наявність зв'язку між функціональними складовими виробу згідно з ГОСТ 2.701-84.

Схема електрична – це документ, в якому представлені у вигляді УГЗ або позначень складові частини виробу, що діють за допомогою електричної енергії, та їх взаємозв'язку згідно з ДСТУ ГОСТ 2.702:2013.

Схеми електричні у залежності від їх основного призначення розділяють на наступні *типи*: структурні; функціональні; принципів; з'єднань; підключення; загальні; розміщення. *Дозволяється розміщувати на схемі пояснювальні надписи, діаграми або таблиці*, які визначають черговість процесів у часі, а також параметри у характерних точках (величини струмів).

Під час оформлення графічної частини (електричні схеми) треба дотримуватись правил, що наведені в ДСТУ ГОСТ 2.702:2013:

- елементи та пристрої зображують на схемі у вигляді УГЗ;
- порядкові номери елементам слід надавати, починаючи з одиниці, у межах групи елементів, яким на схемі надано однакове літерне позначення, наприклад $R1, R2, R3$ та т.п., $L1, L2, L3$ та т.п., $C1, C2, C3$ та т.п.;
- *порядкові номери* потрібно надавати у відповідності до розміщення елементів та пристроїв на схемі *зверху до низу у напрямку зліва направо*;
- позиційні позначення проставляють на схемі біля УГЗ елементів з правої сторони або згори. Дозволяється позиційне позначення проставляти у середині прямокутника УГЗ;
- на схемі рекомендується вказувати технічні характеристики функціональних частин (біля графічного позначення або на вільній ділянці схеми);
- при вказівці біля УГП номіналів резисторів допускається застосовувати спрощений спосіб позначення одиниць величин, наприклад від 0 до 999 (Ом) величини одиниць не проставляються, від $1 \cdot 10^3$ до $999 \cdot 10^3$ (Ом) величини одиниць проставляються в кілоомах (кОм), від $1 \cdot 10^6$ до $999 \cdot 10^6$ (Ом) величини одиниць проставляються в мегаомах (М Ом), більш ніж $1 \cdot 10^9$ (Ом) величини одиниць проставляються в гігаомах (Г Ом).

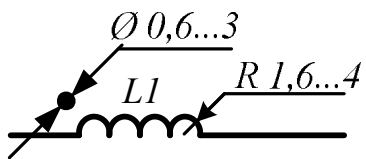
Для конденсаторів від 0 до $9999 \cdot 10^{-12}$ (Ф) – в пікофарадах без вказівки одиниць вимірювання (пФ), від $1 \cdot 10^{-8}$ до $9999 \cdot 10^{-6}$ (Ф) – в мікрофарадах з позначенням одиниці вимірювання (мкФ).

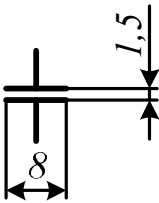
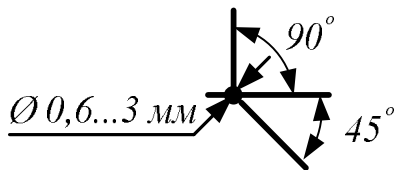
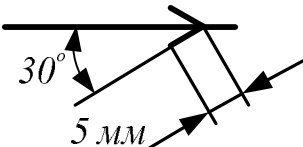
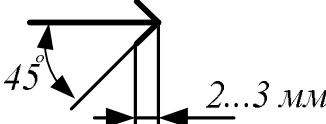
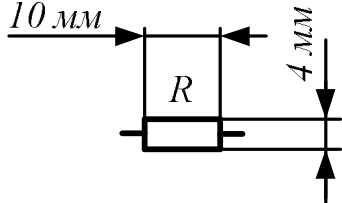
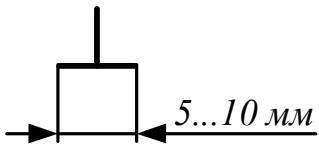
1.1 Загальні вимоги до виконання електричних схем

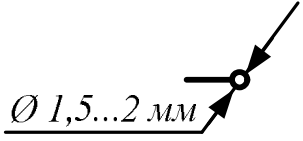
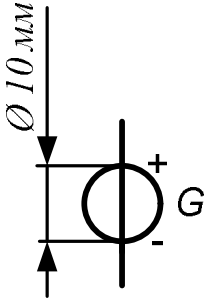
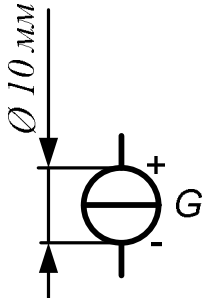
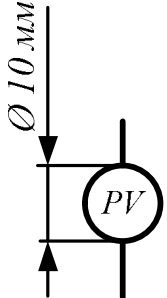
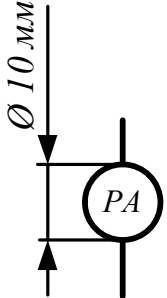
1. Відстань між сусідніми паралельними лініями зв'язку не повинно бути менше 3,0 мм. Відстань між окремими УГЗ повинно бути не менше 2,0 мм згідно з ГОСТ 2.701-84.
2. Усі розміри графічних зображень дозволяється пропорційно змінювати.
3. Лінії зв'язку виконують товщиною від 0,2 до 1,0 мм в залежності від форматів схеми та розмірів графічних позначень. Рекомендована товщина лінії від 0,3 до 0,4 мм.
4. Графічні зображення на схемах необхідно виконувати тієї ж товщиною, що і лінії зв'язку згідно з ГОСТ 2.728-74.
5. УГЗ елементів представляють на схемі в положенні, в якому вони приведені у відповідних стандартах, або оберненими на кут, кратний 90° , якщо у відповідних стандартах відсутні спеціальні вказівки.

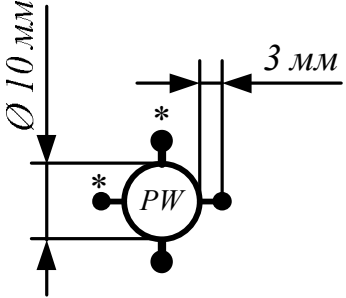
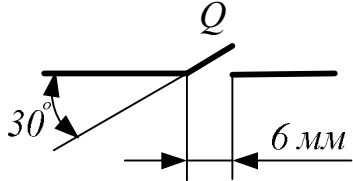
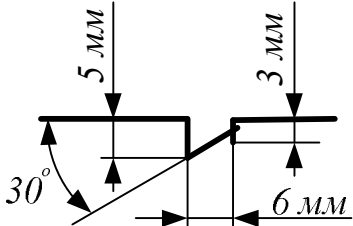
У табл. 1 наведено умовні графічні зображення електричних елементів та їх найменування, які використовуються при оформленні самостійних та контрольних робіт.

Таблиця 1 – Умовні графічні позначення елементів електричної схеми

№	Найменування елемента	Графічне зображення та позначення елемента
1	Котушка індуктивності (загальний символ, дросель без магнітопроводу). Для позначення початку обмотки використовують крапка згідно з [ГОСТ 2.723-68, ІЕС 617-4:1996]	

№	Найменування елемента	Графічне зображення та позначення елемента
2	Конденсатор сталої ємності (загальний символ) згідно з [ГОСТ 2.728-74, ІЕС 617-4:1996]	
3	Лінія електричного зв'язку із двома відгалуженнями, які дозволяють зображувати під кутами, що кратні 45° згідно з ГОСТ 2.721-74	
4	Напрямок енергетичного потоку (сигнал електричний в одному напрямку) згідно з ГОСТ 2.721-74	
5	Контакт роз'ємного з'єднання згідно з ГОСТ 2.755-87	
6	Резистор постійний згідно з ГОСТ 2.728-74	
7	Електричне з'єднання з корпусом згідно з ГОСТ 2.721-74	

№	Найменування елемента	Графічне зображення та позначення елемента
8	Контакт розбірного з'єднання згідно з ГОСТ 2.755-87	
9	Ідеальне джерело напруги [ГОСТ 2.721-74, ІЕС 617-2:1996]	
10	Ідеальне джерело струму [ГОСТ 2.721-74, ІЕС 617-2:1996]	
11	Прилад електровимірювальний згідно з ГОСТ 2.747-68 Літерно-цифрове позначення вольтметра на електричних схемах згідно з ГОСТ 2.710-81	
12	Прилад електровимірювальний згідно з ГОСТ 2.747-68 Літерно-цифрове позначення амперметра на електричних схемах згідно з ГОСТ 2.710-81]	

№	Найменування елемента	Графічне зображення та позначення елемента
13	<p>Прилад електровимірювальний згідно з ГОСТ 2.729-68</p> <p>Літерно-цифрове позначення ватметра на електричних схемах згідно з ГОСТ 2.710-81</p>	
14	<p>Контакт комутаційного пристрою (який замикається) згідно з ГОСТ 2.755-87</p> <p>Літерно-цифрове позначення вимикачі у силових колах Q (роз'єднувачі, короткозамикачі, автоматичні вимикачі (силові)) на електричних схемах згідно з ГОСТ 2.710-81</p> <p>S - пристрої комутаційні в ланцюгах керування, сигналізації та вимірювання (вимикачі, перемикачі, вимикачі, які спрацьовують від різних впливів).</p>	
14	<p>Контакт комутаційного пристрою (який розмикається) згідно з ГОСТ 2.755-87 (ГОСТ 2.755-74)</p>	

РОЗДІЛ 1

ЛІНІЙНІ ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА ПЕРІОДИЧНОГО ЗМІННОГО СТРУМУ

Практичне заняття №1 Розрахунок трифазного симетричного кола

Розрахункова схема на фазу симетричного 3-фазного кола. Визначення струмів і напруг в розрахунковій схемі та у всіх фазах кола. Суміщена векторна діаграма напруг і струмів симетричного трифазного кола.

Список додаткової літератури для засвоєння викладеного матеріалу:

1. Щерба А.А Симетричні складові та вищі гармоніки у трифазних колах: Метод. вказівки до виконання розрахункових робіт з курсу «Теоретична електротехніка» / А.А Щерба, І.А Курило, І.Н Намацалюк // для студ. напрямів підготовки 0906 «Електротехніка». – К.: НТУУ «КПІ», 2007. – 76 с.

2. Перетятко Ю.В. Теоретичні основи електротехніки: Нелінійні системи. Перехідні процеси. [Електронний ресурс]: практикум. для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»/ КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: Ю. В. Перетятко. А.А. Щерба – Електронні текстові дані (1 файл: 20,4 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 140 с.

3. Кудря Є.А. Електричні кола несинусоїдного струму: Методичні вказівки до виконання розрахункових робіт з дисципліни: Теоретичні основи електротехніки, для студентів спеціальностей: Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка всіх форм навчання / Уклад.: Є. А Кудря, І. Н. Намацалюк, Ю.В. Перетятко. – К.: НТУУ "КПІ", 2016.– 58 с.

4. Корощенко О.В. «Теоретичні основи електротехніки. Збірник задач: навчальний посібник» / укл. О.В. Корощенко, В.Ф. Денник, О.А. Журавель та ін.; за заг.ред. О.В.Корощенко.- Донецьк, ДВНЗ «ДонНТУ», 2012.- 673 с.

5. Курило І.А. Розрахунок перехідних процесів у лінійних електричних колах : навч. посіб. / І.А. Курило, В.П. Грудська, Л.Ю. Спінул, М.А. Щерба.- К.: НТУУ “КПІ”, 2013.-289 с.

Симетричне трифазне коло – це електричне коло в якому діє симетричний трифазний генератор будь-якої послідовності та комплексні опори проводів та навантаження кожної фази однакові [1].

Для симетричної трифазної системи під час з’єднання фаз джерела чи споживача за схемою «зірка» існують наступні залежності між лінійними та фазними напругами й струмами [2]

$$U_{\text{л}} = \sqrt{3}U_{\text{ф}}; I_{\text{л}} = I_{\text{ф}}. \quad (1.1.1)$$

Для симетричної трифазної системи під час з’єднання фаз джерела чи споживача за схемою «трикутник» лінійні та фазні напругами й струмами пов’язані між собою наступними виразами

$$U_{\text{л}} = U_{\text{ф}}; I_{\text{л}} = \sqrt{3}I_{\text{ф}}. \quad (1.1.2)$$

Активна потужність у трифазній симетричній системі визначається за формулою

$$P = 3 \cdot U_{\text{ф}} \cdot I_{\text{ф}} \cdot \cos(\varphi_{\text{ф}}) = \sqrt{3} \cdot U_{\text{л}} \cdot I_{\text{л}} \cdot \cos(\varphi_{\text{ф}}). \quad (1.1.3)$$

Задача 1

До симетричного трифазного генератора з фазної ЕРС $E_{\text{ф}} = 235$ (В) та внутрішнім опором $\underline{Z}_0 = 0.4 + j \cdot 0.9$ (Ом) підключено симетричне навантаження, що з’єднане у зірку з нульовим проводом (рис. 1.1.1). Початкова фаза ЕРС обмотки А $\varphi_A = 0$. Опори фаз навантаження

дорівнюють: $\underline{Z} = \underline{Z}_A = \underline{Z}_B = \underline{Z}_C = 10 + j \cdot 6$ Ом. Опір нульового проводу та лінії однакові $\underline{Z}_{\text{пр}} = \underline{Z}_N = 0.5 + j$ (Ом).

Визначити струми у кожній фазі та нульовому проводі, фазну та лінійні напруги генератора та навантаження, напругу зміщення нейтралі, активну потужність, яка виробляється генератором та активну потужність, що споживається навантаженням. Побудувати векторну діаграму.

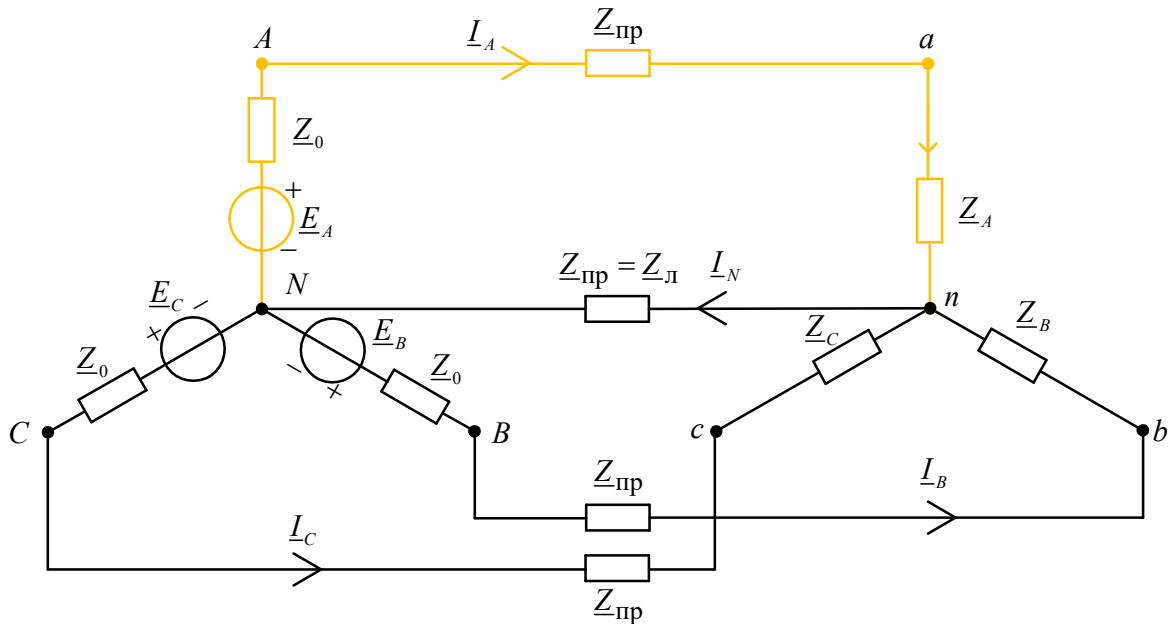


Рисунок 1.1.1 – Схема симетричного трифазного електричного кола

Рішення

Розрахунок симетричного кола з генератором прямої чи зворотної послідовностей достатньо провести за однією фазою. Струми у інших фазах відповідно будуть однакові за модулем та зсунуті відносно базового на $\pm 120^\circ$ [1].

Визначимо струм фази A , розрахункова схема якої представлена на рис.

1.1.2. Введемо у розгляд коефіцієнти $a = e^{j120^\circ}$, $a^2 = e^{-j120^\circ}$.

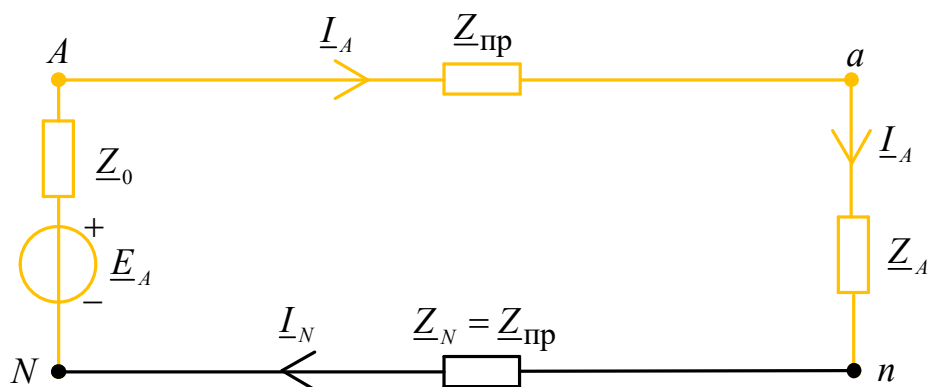


Рисунок 1.1.2 – Схема електричного кола фази A трифазної системи

Запишемо значення ЕРС фаз генератора у комплексній формі:

$$\begin{aligned} \underline{E}_A &= E_\phi \cdot e^{j\varphi_A} = 235 \cdot e^{j0} = 235 \text{ (В)}; \\ \underline{E}_B &= \underline{E}_A \cdot a^2 = 235 \cdot e^{-j120^\circ} = -117.5 - j \cdot 203.516 \text{ (В)}; \\ \underline{E}_C &= \underline{E}_A \cdot a = 235 \cdot e^{j120^\circ} = -117.5 + j \cdot 203.516 \text{ (В)}. \end{aligned} \quad (1.1.4)$$

Знайдемо еквівалентний опір фази та струми трифазної системи:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{\text{еА}} &= \underline{Z}_A + \underline{Z}_{\text{пр}} + \underline{Z}_0 = (10 + j6) + (0.5 + j) + (0.4 + j0.9) = \\ &= 10.9 + j7.9 = 13.462 \angle 35.933^\circ \text{ (Ом)}; \\ \underline{I}_A &= \frac{\underline{E}_A}{\underline{Z}_{\text{еА}}} = \frac{235}{13.462 \angle 35.933^\circ} = 17.457 \angle -35.933^\circ \text{ (А)}; \\ \underline{I}_B &= \underline{I}_A a^2 = \underline{I}_A e^{-j120^\circ} = 17.457 \angle -35.933^\circ e^{-j120^\circ} = 17.457 \angle -155.933^\circ \text{ (А)}; \\ \underline{I}_C &= \underline{I}_A a = \underline{I}_A e^{j120^\circ} = 17.457 \angle -35.933^\circ e^{j120^\circ} = 17.457 \angle 84.067^\circ \text{ (А)}; \end{aligned} \quad (1.1.5)$$

$$\boxed{\underline{I}_N = \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = 0}.$$

У симетричному трифазному колі з генератором прямої чи зворотної послідовностей струм у нейтральному проводі відсутній, а діючі значення всіх фазних струмів однакові $I_A = I_B = I_C$ [1].

Напруга між нейтральними вузлами споживача та генератора визначається:

$$\begin{aligned}\underline{Y}_A = \underline{Y}_B = \underline{Y}_C &= \frac{1}{\underline{Z}_{eA}} = \frac{1}{13.462 \angle 35.933^\circ} = 13.462 \angle 35.933^\circ (\text{Cm}); \\ \underline{Y}_N &= \frac{1}{\underline{Z}_N} = 0.5 + j = 0.894 \angle -63.435^\circ (\text{Cm}); \\ U_{nN} &= \frac{\underline{Y}_A \underline{E}_A + \underline{Y}_B \underline{E}_B + \underline{Y}_C \underline{E}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C + \underline{Y}_N} = 0.\end{aligned}\tag{1.1.6}$$

Знайдемо фазну напругу на полюсах генератора та навантаження:

$$\begin{aligned}\underline{U}_{AN} &= (\underline{E}_A - \underline{I}_A \underline{Z}_0) = 220.295 \angle -2.243^\circ (\text{B}); \\ \underline{U}_{BN} &= \underline{U}_{AN} \cdot a^2 = 220.295 \angle -122.243^\circ (\text{B}); \\ \underline{U}_{CN} &= \underline{U}_{AN} \cdot a = 220.295 \angle 117.757^\circ (\text{B}); \\ \underline{U}_{an} &= \underline{I}_A \cdot \underline{Z}_A = 203.58 \angle -4.97^\circ (\text{B}); \\ \underline{U}_{bn} &= \underline{U}_{an} \cdot a^2 = 203.58 \angle -124.97^\circ (\text{B}); \\ \underline{U}_{cn} &= \underline{U}_{an} \cdot a = 203.58 \angle 115.03^\circ (\text{B}).\end{aligned}\tag{1.1.7}$$

Визначимо напруги на інших ділянках трифазного кола:

$$\begin{aligned}\underline{U}_{Aa} &= \underline{I}_A \underline{Z}_{\text{пр}} = 19.517 \angle 27.501^\circ (\text{B}); \\ \underline{U}_{Bb} &= \underline{U}_{Aa} \cdot a^2 = 19.517 \angle -92.499^\circ (\text{B}); \\ \underline{U}_{Cc} &= \underline{U}_{Aa} \cdot a = 19.517 \angle 147.501^\circ (\text{B}); \\ \underline{U}_{A0} &= \underline{I}_A \underline{Z}_0 = 17.193 \angle 30.104^\circ (\text{B}); \\ \underline{U}_{B0} &= \underline{U}_{A0} \cdot a^2 = 17.193 \angle -89.896^\circ (\text{B}); \\ \underline{U}_{C0} &= \underline{U}_{A0} \cdot a = 17.193 \angle 150.104^\circ (\text{B}).\end{aligned}\tag{1.1.8}$$

Знайдемо лінійну напругу на полюсах генератора:

$$\begin{aligned}\underline{U}_{AB} &= \underline{U}_{AN} - \underline{U}_{BN} = \\ &= 220.295 \angle -2.243^\circ - 220.295 \angle -122.243^\circ = \\ &= 381.562 \angle 27.757^\circ (\text{B}); \\ \underline{U}_{BC} &= \underline{U}_{AB} \cdot a^2 = 381.562 \angle -92.243^\circ (\text{B}); \\ \underline{U}_{CA} &= \underline{U}_{AB} \cdot a = 381.562 \angle 147.757^\circ (\text{B}).\end{aligned}\tag{1.1.9}$$

Лінійна напруга на навантаженні дорівнює:

$$\begin{aligned}
\underline{U}_{ab} &= \underline{U}_a - \underline{U}_b = \\
&= 203.58 \angle -4.97^\circ - 203.58 \angle -124.97^\circ = 352.61 \angle 25.03^\circ (\text{В}); \\
\underline{U}_{bc} &= \underline{U}_{ab} \cdot a^2 = 352.61 \angle -94.97^\circ (\text{В}); \\
\underline{U}_{ca} &= \underline{U}_{ab} \cdot a = 352.61 \angle 145.03^\circ (\text{В}).
\end{aligned}
\tag{1.1.10}$$

Складемо баланс активних потужностей:

$$\begin{aligned}
P_{\text{дж}} &= 3 \cdot E_A \cdot I_A \cdot \cos(\psi_{E_A} - \psi_{I_A}) = \\
&= 3 \cdot E_A \cdot I_A \cdot \cos(0 - (-35.933^\circ)) = 9965 (\text{Вт}); \\
P_{\text{сп}} &= 3 \cdot (\text{Re}(\underline{Z}_{eA}) \cdot I_A^2) + \text{Re}(\underline{Z}_N) \cdot I_N^2 = \\
&= 3 \cdot (\text{Re}(10.9 + j7.9) \cdot 17.457^2) + \text{Re}(0.5 + j) \cdot 0 = \\
&= 3 \cdot (10.9 \cdot 17.457^2 + 0.5 \cdot 0) = 9965 (\text{Вт}).
\end{aligned}
\tag{1.1.11}$$

Векторна діаграма напруг та струмів трифазної симетричної системи з нульовим проводом зображена на рис. 3.1.3.

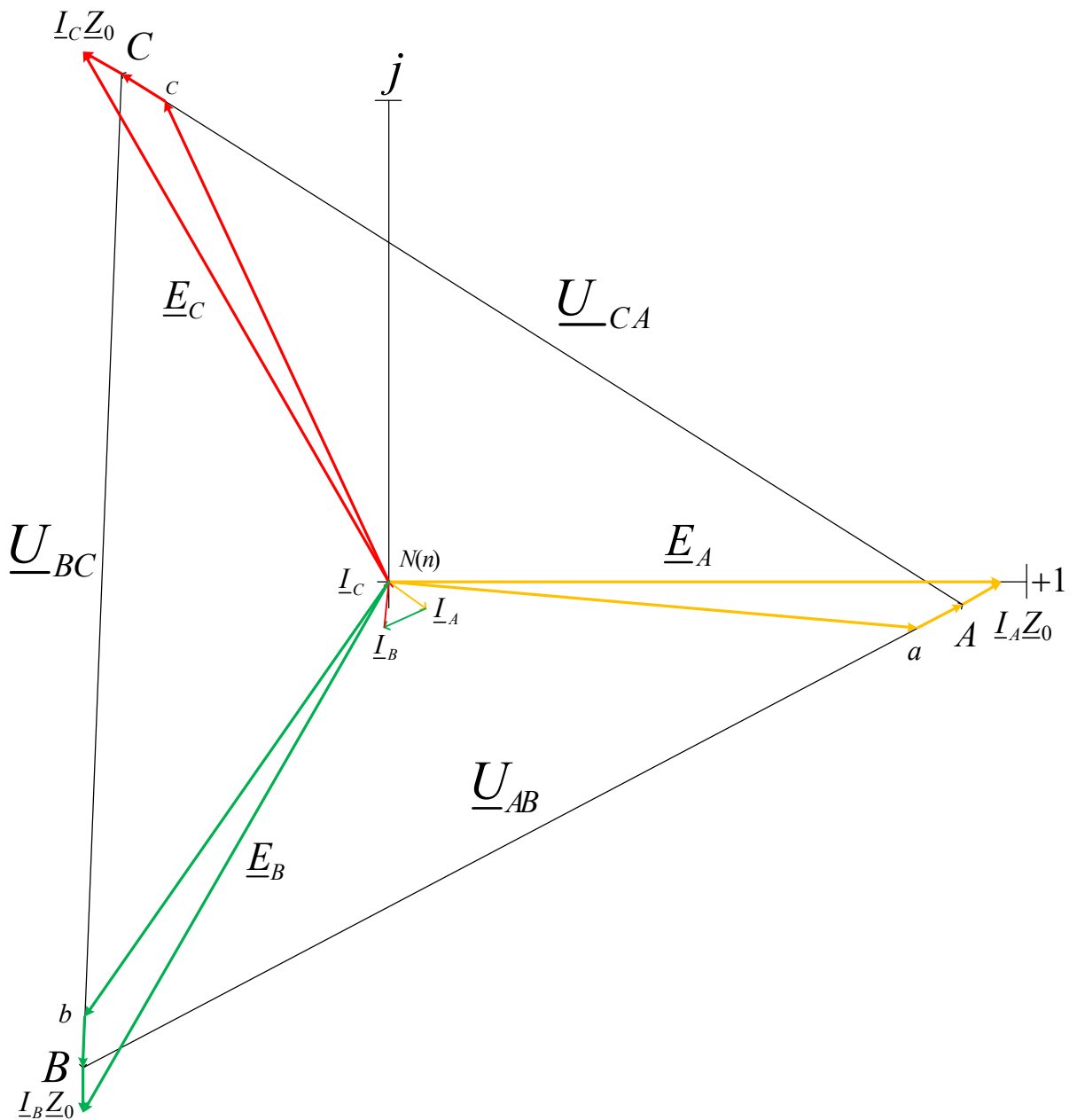


Рисунок 1.1.3 – Векторна діаграма напруг та струмів трифазної симетричної системи з нульовим проводом

Задача 2

До трифазної лінії з симетричним лінійними напругами $U_{\text{л}}=220$ (В) підключено трикутником навантаження рис. 1.2.1, опір кожної фази якого симетричного $\underline{Z}=(10-j10)$ (Ом). Знайти струми в кожній фазі споживача та лінії та покази ватметрів. Побудувати векторну діаграму **(надати студентам для самостійного виконання)**.

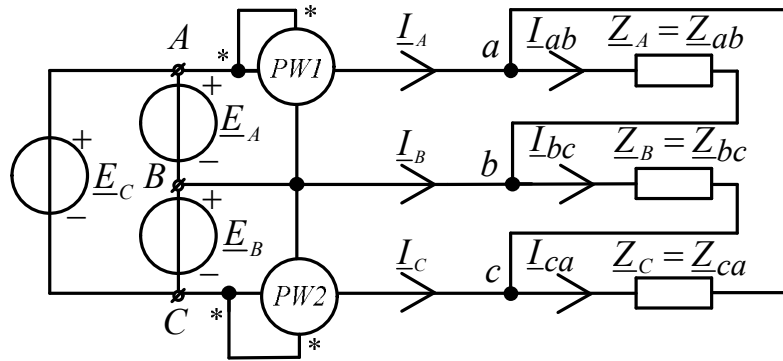


Рисунок 1.2.1 - Електрична схема трифазного кола

Запишемо комплекси лінійних напруг:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{AB} &= U_{\text{Л}} e^{j0} = 220 \text{ (В)}; \\ \underline{U}_{BC} &= U_{\text{Л}} e^{-j120^\circ} = 220 e^{-j120^\circ} \text{ (В)}; \\ \underline{U}_{CA} &= U_{\text{Л}} e^{j120^\circ} = 220 e^{j120^\circ} \text{ (В)}. \end{aligned} \quad (1.2.1)$$

Визначимо комплекси фазних та лінійних струмів:

$$\begin{aligned} \underline{I}_{ab} &= \frac{\underline{U}_{AB}}{\underline{Z}_A} = \frac{220 e^{j0^\circ}}{10 - j10} = 11 + j11 = 15.556 e^{j45^\circ} \text{ (А)}; \\ \underline{I}_{bc} &= \frac{\underline{U}_{BC}}{\underline{Z}_B} = \frac{220 e^{-j120^\circ}}{10 - j10} = 4.026 - j15.026 = 15.556 e^{-j75^\circ} \text{ (А)}; \\ \underline{I}_{ca} &= \frac{\underline{U}_{CA}}{\underline{Z}_C} = \frac{220 e^{j120^\circ}}{10 - j10} = -15.026 + j4.026 = 15.556 e^{j165^\circ} \text{ (А)}; \\ \underline{I}_A &= \underline{I}_{ab} - \underline{I}_{ca} = (11 + j11) - (-15.026 + j4.026) = \\ \underline{I}_A &= 26.026 + j6.974 = 26.974 e^{j15^\circ} \text{ (А)}; \\ \underline{I}_B &= \underline{I}_{bc} - \underline{I}_{ab} = (4.026 - j15.026) - (11 + j11) = \\ \underline{I}_B &= -6.974 - j26.026 = 26.974 e^{-j105^\circ} \text{ (А)}; \\ \underline{I}_C &= \underline{I}_{ca} - \underline{I}_{bc} = (-15.026 + j4.026) - (4.026 - j15.026) = \\ \underline{I}_C &= -19.053 + j19.053 = 26.974 e^{j135^\circ} \text{ (А)}. \end{aligned} \quad (1.2.2)$$

Знайдемо покази ватметрів:

$$P_{\text{ДЖ}} = \operatorname{Re}(\underline{U}_{AB} \underline{I}_A^*) + \operatorname{Re}(-\underline{U}_{BC} \underline{I}_C^*) =$$

$$P_{\text{ДЖ}} = \operatorname{Re}(220e^{j0} \cdot 26.944e^{-j15^\circ}) + \operatorname{Re}(-220e^{-j120^\circ} \cdot 26.944e^{-j135^\circ}) = \quad (1.2.3)$$

$$= 7260 \text{ (Вт)};$$

$$P_{\text{СП}} = 3 \cdot I_{ca}^2 R = 3 \cdot 15.556^2 \cdot 10 = 7260 \text{ (Вт)}.$$

На рис. 3.1.2.2 представлена векторна діаграма напруг та струмів.

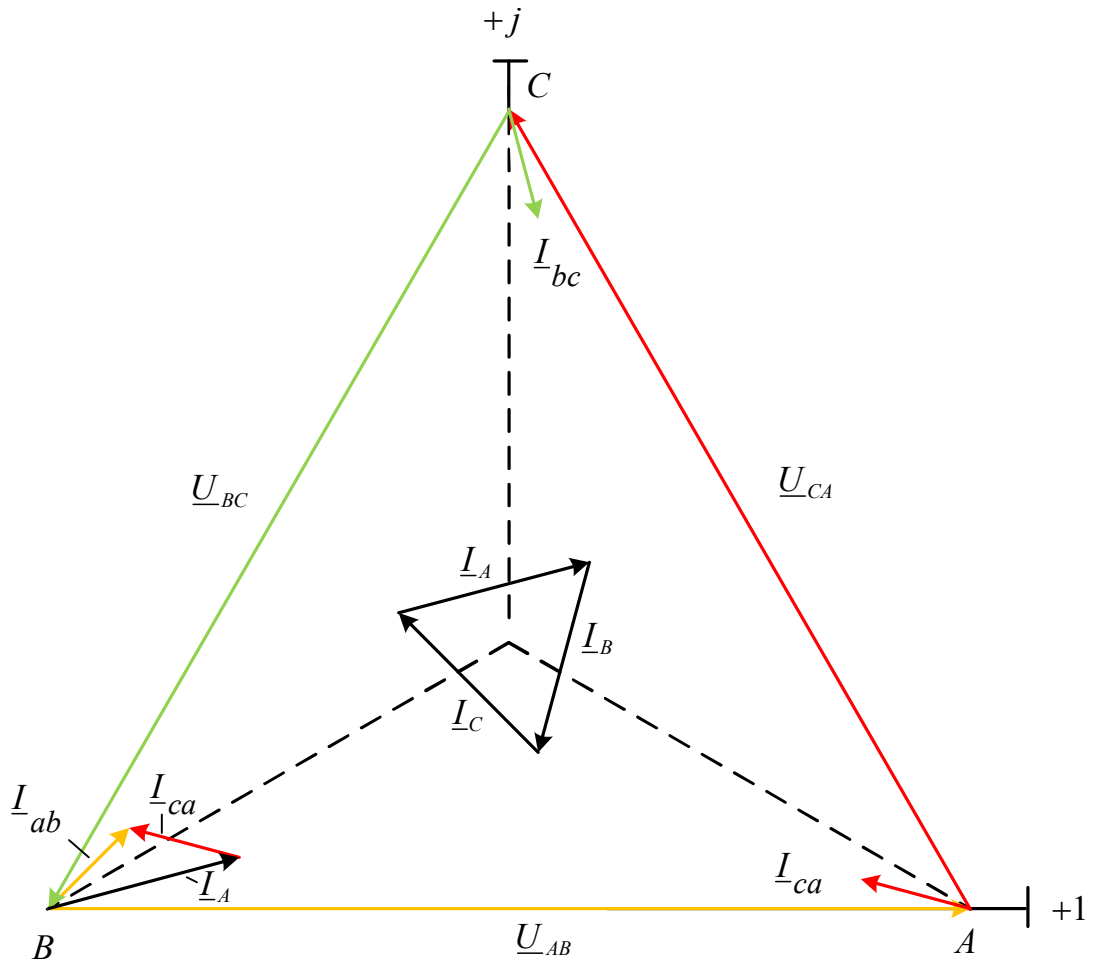


Рисунок 1.2.2 – Векторна діаграма напруг та струмів трифазної симетричної системи

Задача 3

До симетричного трифазного генератора з фазної ЕРС $E_{\phi} = 127$ (В) підключено симетричне навантаження, що з'єднане за схемою «трикутник» рис. 1.3.1. Початкова фаза ЕРС обмотки A $\phi_A = 0$. Опори фаз навантаження дорівнюють: $Z_{ab} = Z_{bc} = Z_{ca} = 8.4 + j6.6$ (Ом). Опір лінійного проводу $Z_{\text{лп}} = 0.5 + j1.5$ (Ом).

Визначити струми кожній фазі генератора та навантаження, фазну та лінійні напруги генератора та навантаження, втрати напруги в лінії. Зробити перевірку за балансом потужностей.

Побудувати векторну діаграму. Визначити покази приладів.

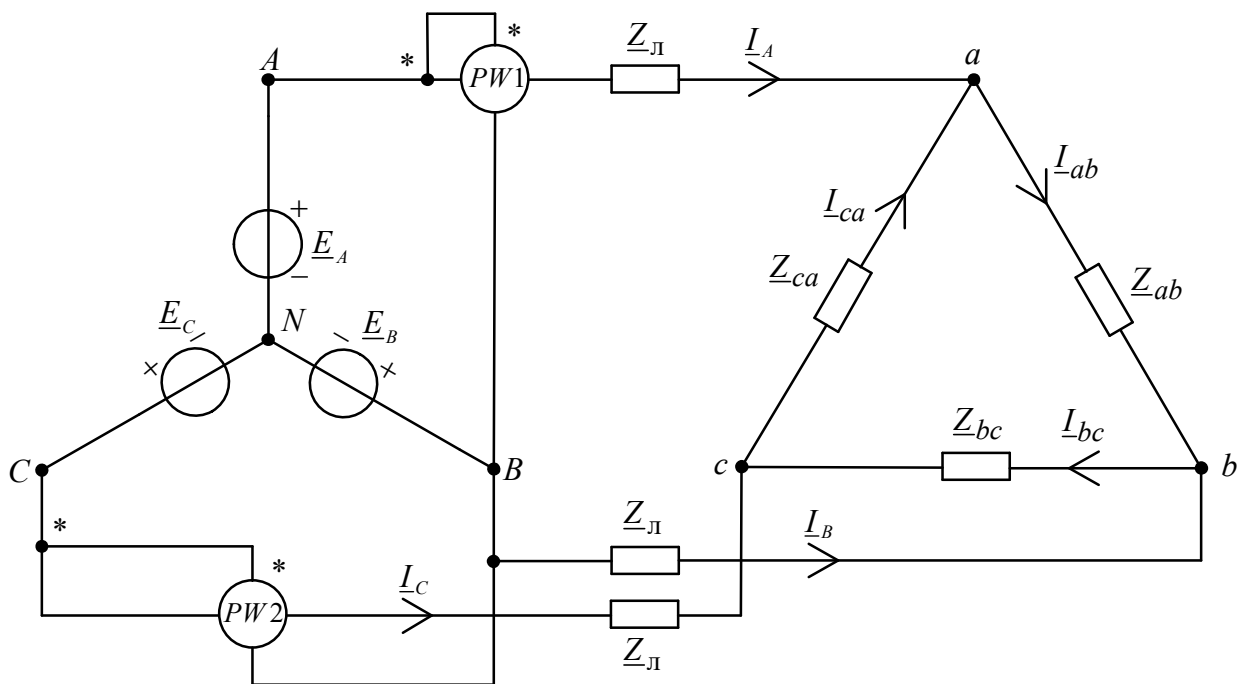


Рисунок 1.3.1 – Схема симетричного трифазного електричного кола

Рішення

Запишемо значення ЕРС фаз генератора у комплексній формі:

$$\begin{aligned}\underline{E}_A &= E_\phi e^{j\varphi_A} = 127e^{j0} = 127(\text{В}); \\ \underline{E}_B &= \underline{E}_A a^2 = 127e^{-j120^\circ}(\text{В}); \\ \underline{E}_C &= \underline{E}_A a = 127e^{j120^\circ}(\text{В}).\end{aligned}\tag{1.3.1}$$

Перетворимо з'єднання трифазного споживача за схемою «трикутник» в еквівалентну зірку рис. 1.3.2.

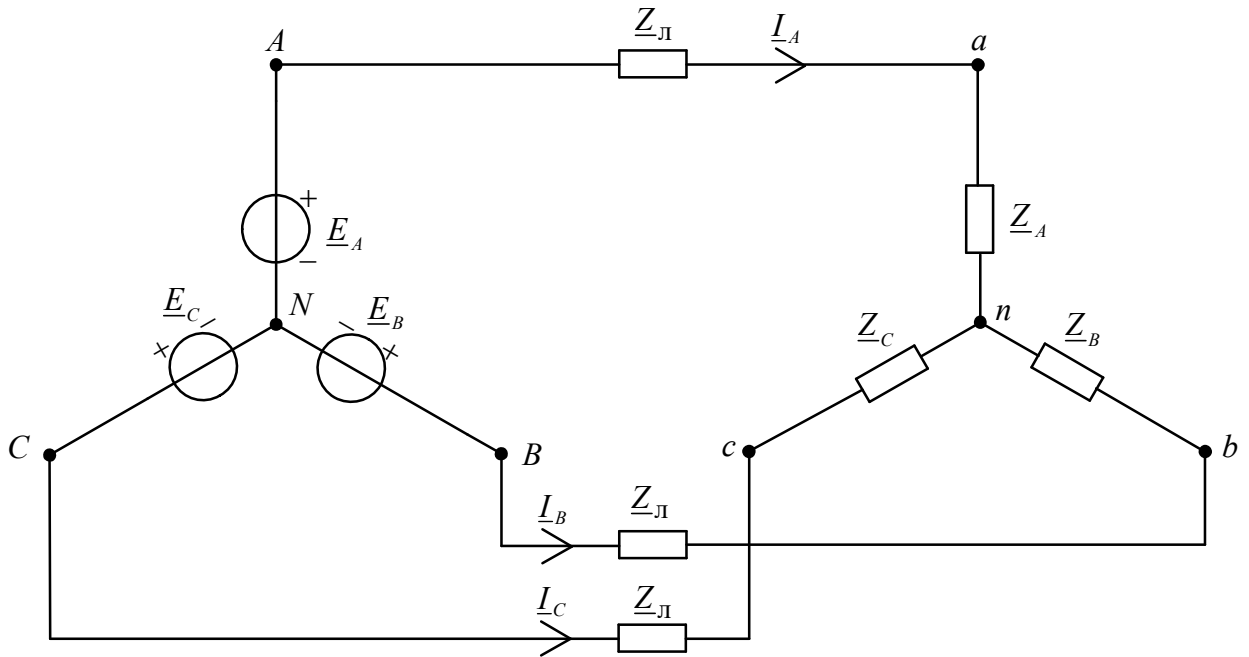


Рисунок 1.3.2 – Схема симетричного трифазного електричного кола при з'єднанні споживача за схемою «зірка»

$$\underline{Z}_A = \underline{Z}_B = \underline{Z}_C = \frac{\underline{Z}_{ab}}{3} = 3.561 \angle 38.157^\circ (\text{Ом}).\tag{1.3.2}$$

Знайдемо еквівалентний опір фази та струми трифазної системи:

$$\begin{aligned}\underline{Z}_{eA} &= \underline{Z}_A + \underline{Z}_л = 4.958 \angle 48.27^\circ (\text{Ом}); \\ \underline{Y}_A = \underline{Y}_B = \underline{Y}_C &= \frac{1}{\underline{Z}_{eA}} = 0.202 \angle -48.27^\circ (\text{См}); \\ \underline{U}_{nN} &= \frac{\underline{E}_A \cdot \underline{Y}_A + \underline{E}_B \cdot \underline{Y}_B + \underline{E}_C \cdot \underline{Y}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C} = 0;\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\underline{I}_A &= \frac{\underline{E}_A - \underline{U}_{nN}}{\underline{Z}_{eA}} = 25.616 \angle -48.27^\circ (\text{A}); \\ \underline{I}_B &= \underline{I}_A \cdot a^2 = 25.616 \angle -168.27^\circ (\text{A}); \\ \underline{I}_C &= \underline{I}_A \cdot a = 25.616 \angle 71.73^\circ (\text{A});\end{aligned}\tag{1.3.3.}$$

$$\underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = 0.$$

Знайдемо фазну напругу на полюсах генератора та навантаження:

$$\begin{aligned}\underline{U}_{AN} &= \underline{E}_A = 127 \angle 0^\circ (\text{В}); \\ \underline{U}_{BN} &= \underline{U}_{AN} \cdot a^2 = 127 \angle -120^\circ (\text{В}); \\ \underline{U}_{CN} &= \underline{U}_{AN} \cdot a = 127 \angle 120^\circ (\text{В}); \\ \underline{U}_{an} &= \underline{I}_A \cdot \underline{Z}_A = 91.216 \angle -10.113^\circ (\text{В}); \\ \underline{U}_{bn} &= \underline{U}_{an} \cdot a^2 = 91.216 \angle -130.113^\circ (\text{В}); \\ \underline{U}_{cn} &= \underline{U}_{an} \cdot a = 91.216 \angle 109.887^\circ (\text{В}).\end{aligned}\tag{1.3.4}$$

Визначимо втрати напруги в лінії:

$$\begin{aligned}\underline{U}_{Aa} &= \underline{I}_A \cdot \underline{Z}_\pi = 40.503 \angle 23.295^\circ (\text{В}); \\ \underline{U}_{Bb} &= \underline{U}_{Aa} \cdot a^2 = 40.503 \angle -96.705^\circ (\text{В}); \\ \underline{U}_{Cc} &= \underline{U}_{Aa} \cdot a = 40.503 \angle 143.295^\circ (\text{В}).\end{aligned}\tag{1.3.5}$$

Знайдемо лінійну напругу на полюсах генератора:

$$\begin{aligned}\underline{U}_{AB} &= \underline{U}_{AN} - \underline{U}_{BN} = 219.97 \angle 30^\circ (\text{В}); \\ \underline{U}_{BC} &= \underline{U}_{AB} \cdot a^2 = 219.97 \angle -90^\circ (\text{В}); \\ \underline{U}_{CA} &= \underline{U}_{AB} \cdot a = 219.97 \angle 150^\circ (\text{В}).\end{aligned}\tag{1.3.6}$$

Лінійна напруга на навантаженні дорівнює:

$$\begin{aligned}\underline{U}_{ab} &= \underline{U}_a - \underline{U}_b = 157.991 \angle 19.887^\circ (\text{В}); \\ \underline{U}_{bc} &= \underline{U}_{ab} \cdot a^2 = 157.991 \angle -100.113^\circ (\text{В}); \\ \underline{U}_{ca} &= \underline{U}_{ab} \cdot a = 157.991 \angle 139.887^\circ (\text{В}).\end{aligned}\tag{1.3.7}$$

Розрахуємо фазні струми навантаження:

$$\begin{aligned} \underline{I}_{ab} &= \frac{\underline{U}_{ab}}{\underline{Z}_{ab}} = 14.789 \angle -18.27^\circ (\text{A}); \\ \underline{I}_{bc} &= \underline{I}_{ab} \cdot a^2 = 14.789 \angle -138.27^\circ (\text{A}); \\ \underline{I}_{ca} &= \underline{I}_{ab} \cdot a = 14.789 \angle 101.73^\circ (\text{A}). \end{aligned} \quad (1.3.8)$$

Складемо баланс активних потужностей:

$$\begin{aligned} P_{\text{ДЖ}} &= 3 \cdot E_A \cdot I_A \cdot \cos(\psi_{EA} - \psi_{IA}) = \\ &= 127 \cdot 25.616 \cdot \cos(0 - (-48.27^\circ)) = 6496 (\text{Вт}); \\ P_{\text{СП}} &= 3 \cdot (\text{Re}(\underline{Z}_{eA}) \cdot I_A^2) = 3 \cdot (3.3) \cdot 25.616^2 = 6496 (\text{Вт}); \\ P_{\text{СП}} &= 3 \cdot (\text{Re}(\underline{Z}_{ab}) I_{ab}^2 + \text{Re}(\underline{Z}_{\text{Л}}) I_A^2) = \\ &= 3 \cdot (8.4 \cdot 14.789^2 + (0.5) \cdot 25.616^2) = 6496 (\text{Вт}). \end{aligned} \quad (1.3.9)$$

Визначимо активну потужність, яку показують ватметри:

$$\begin{aligned} P_{PW1} &= \text{Re}(\underline{U}_{AB} \underline{I}_A^*) = U_{AB} \cdot I_A \cdot \cos(\psi_{AB} - \psi_A) = \\ &= 219.97 \cdot 25.616 \cdot \cos(30^\circ - (-48.27^\circ)) = 1145 (\text{Вт}); \\ P_{PW2} &= \text{Re}(-\underline{U}_{BC} \underline{I}_C^*) = U_{BC} \cdot I_C \cdot \cos(\psi_{BC} - \psi_C) = \\ &= 219.97 \cdot 25.616 \cdot \cos(-90^\circ - (71.73^\circ)) = 5351 (\text{Вт}); \\ P_{\text{ДЖ}} &= P_{PW1} + P_{PW2} = 1145 + 5351 = 6496 (\text{Вт}). \end{aligned} \quad (1.3.10)$$

Векторна діаграма напруг та струмів трифазної симетричної системи на рис. 3.1.3.3.

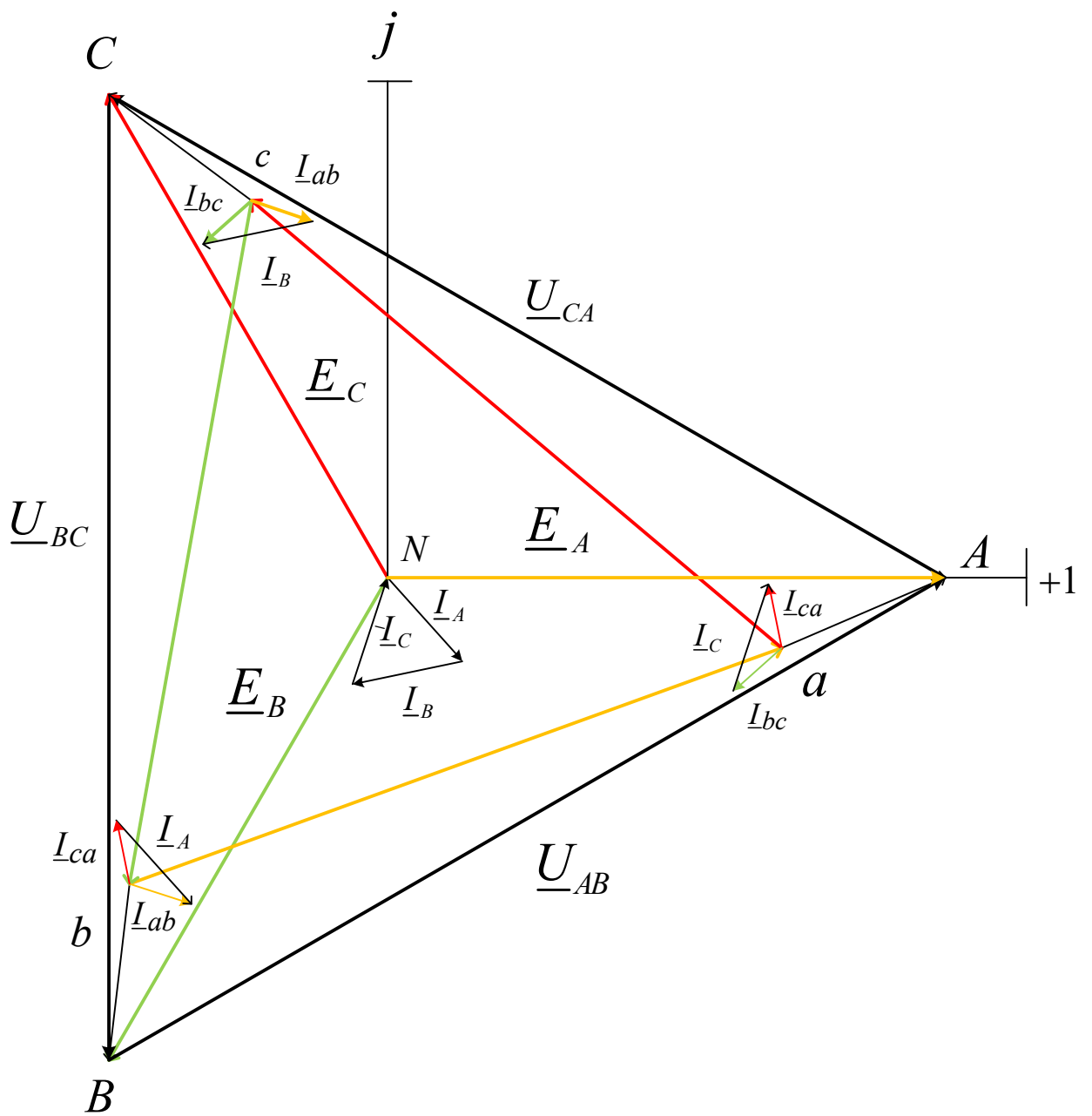


Рисунок 1.3.3 – Векторна діаграма напруг та струмів трифазної симетричної системи

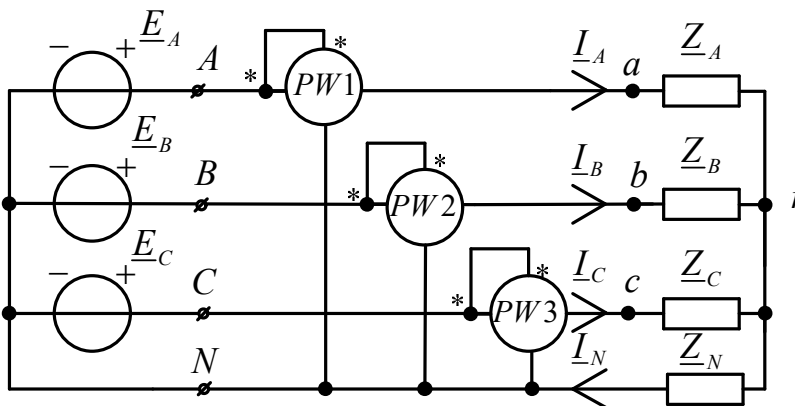
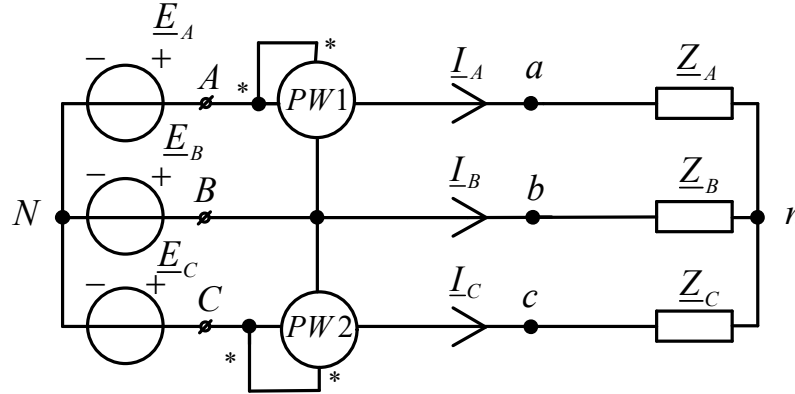
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

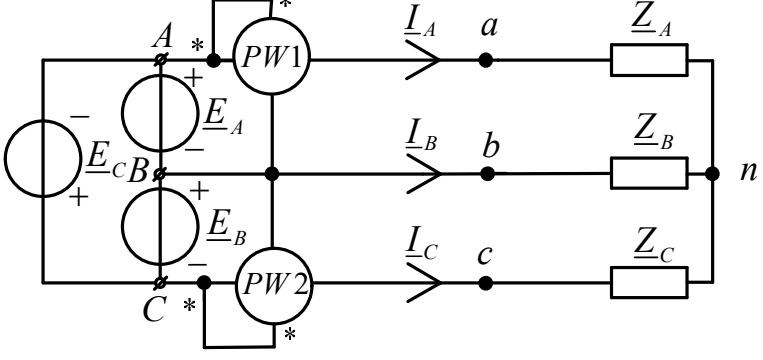
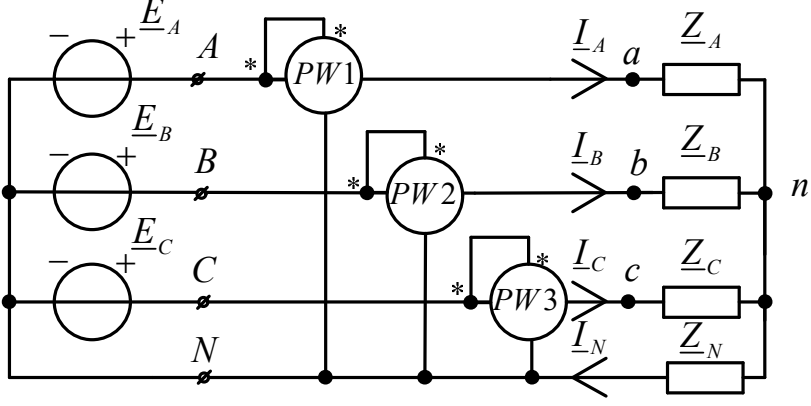
1. Щерба А.А Симетричні складові та вищі гармоніки у трифазних колах: Метод. вказівки до виконання розрахункових робіт з курсу «Теоретична електротехніка» / А.А Щерба, І.А Курило, І.Н Намацалюк // для студ. напрямів підготовки 0906 «Електротехніка». – К.: НТУУ «КПІ», 2007. – 76 с.

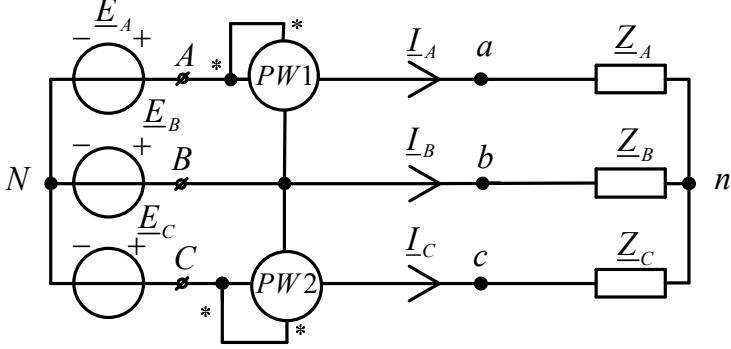
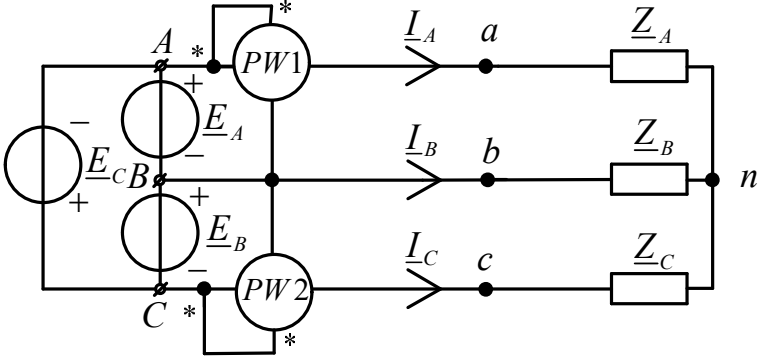
2. Бойко В.С. Теоретичні основи електротехніки: Підручник: У 3 т. / В.С. Бойко, В.В. Бойко, Ю.Ф. Видолоб та ін. // Т.1: Усталені режими лінійних електричних кіл із зосередженими параметрами. – К.: ІВЦ "Видавництво «Політехніка»", 2004. – 272 с.

Завдання для самостійного розрахунку трифазного симетричного кола (варіанти вибрати згідно списку групи)

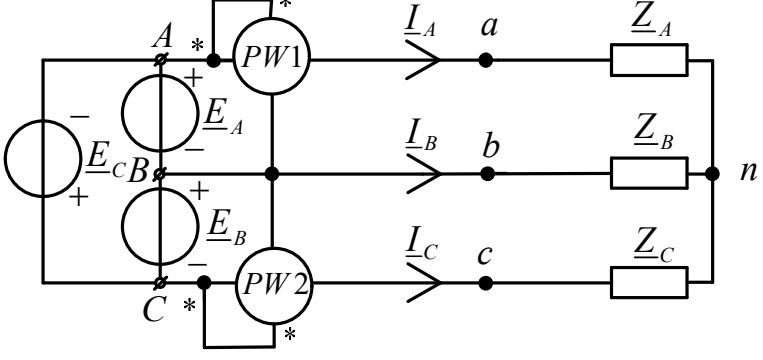
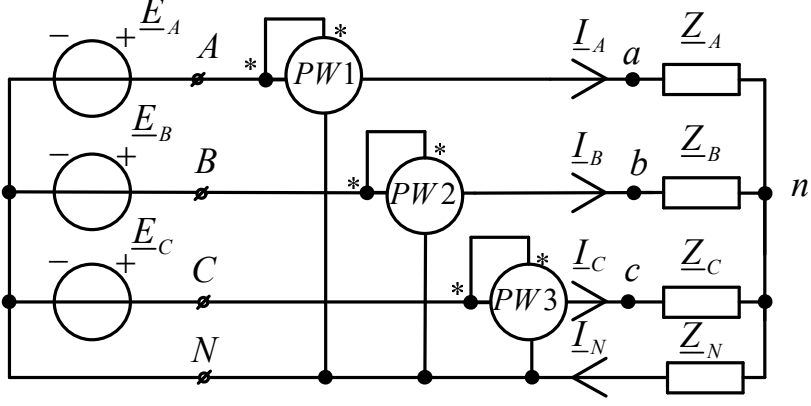
Варіант №1	Симетричний трифазний генератор ЕРС (з'єднання зірка)
Завдання: 1. Розрахувати струми у кожній фазі та нульовому проводі, лінійні напруги генератора, фазну та лінійну напруги навантаження. 2. Визначити активну потужність за допомогою показів ватметрів. 3. Побудувати суміщену векторну діаграму струмів та діаграму напруг.	$E, \text{В}$ 220 $\varphi, \text{градус}$ 0 $\underline{Z}_A, \text{Ом}$ $5+j2$ $\underline{Z}_B, \text{Ом}$ $5+j2$

	$Z_C, \text{ Ом} \quad 5+j2$ $Z_N, \text{ Ом} \quad 1$
<p style="text-align: center;">Варіант №2</p> <p>Завдання:</p> <ol style="list-style-type: none"> Розрахувати струми у кожній фазі та напругу зміщення нейтралі, лінійні напруги генератора, фазну та лінійну напруги навантаження. Визначити активну потужність за допомогою показів ватметрів. Побудувати суміщену векторну діаграму струмів та діаграму напруг. 	<p>Симетричний трифазний генератор ЕРС (з'єднання зірка)</p> $E, \text{ В} \quad 220$ $\phi, \text{ градус} \quad 45$ $Z_A, \text{ Ом} \quad 10-j4$ $Z_B, \text{ Ом} \quad 10-j4$ $Z_C, \text{ Ом} \quad 10-j4$
	<p style="text-align: center;">Варіант №3</p> <p>Завдання:</p> <ol style="list-style-type: none"> Розрахувати струми у кожній фазі, лінійні напруги генератора, фазну та лінійну напруги навантаження. Визначити активну потужність за допомогою показів ватметрів. Побудувати суміщену векторну діаграму струмів та діаграму напруг.
<p>Симетричний трифазний генератор ЕРС (з'єднання трикутник)</p> $E, \text{ В} \quad 220$ $\phi, \text{ градус} \quad 0$	

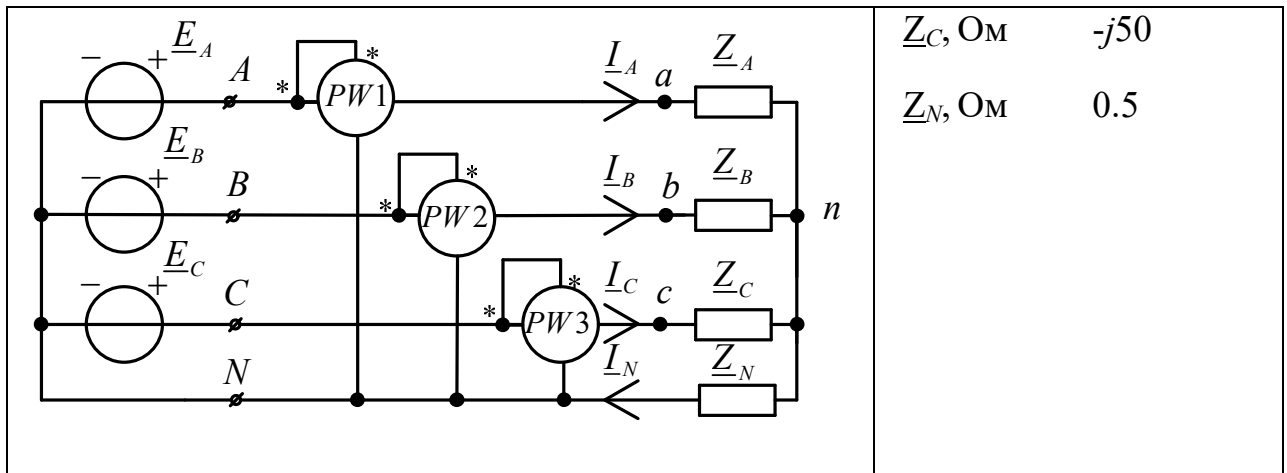
	<table border="0"> <tr> <td>$\underline{Z}_A, \text{ Ом}$</td> <td>$10+j10$</td> </tr> <tr> <td>$\underline{Z}_B, \text{ Ом}$</td> <td>$10+j10$</td> </tr> <tr> <td>$\underline{Z}_C, \text{ Ом}$</td> <td>$10+j10$</td> </tr> </table>	$\underline{Z}_A, \text{ Ом}$	$10+j10$	$\underline{Z}_B, \text{ Ом}$	$10+j10$	$\underline{Z}_C, \text{ Ом}$	$10+j10$						
$\underline{Z}_A, \text{ Ом}$	$10+j10$												
$\underline{Z}_B, \text{ Ом}$	$10+j10$												
$\underline{Z}_C, \text{ Ом}$	$10+j10$												
<p style="text-align: center;">Варіант №4</p> <p>Завдання:</p> <ol style="list-style-type: none"> Розрахувати струми у кожній фазі та нульовому проводі, лінійні напруги генератора, фазну та лінійну напруги навантаження. Визначити активну потужність за допомогою показів ватметрів. Побудувати суміщену векторну діаграму струмів та діаграму напруг. 	<p>Симетричний трифазний генератор ЕРС (з'єднання зірка) з</p> <table border="0"> <tr> <td>$E, \text{ В}$</td> <td>220</td> </tr> <tr> <td>$\varphi, \text{ градус}$</td> <td>30</td> </tr> <tr> <td>$\underline{Z}_A, \text{ Ом}$</td> <td>$5-j4$</td> </tr> <tr> <td>$\underline{Z}_B, \text{ Ом}$</td> <td>$5-j4$</td> </tr> <tr> <td>$\underline{Z}_C, \text{ Ом}$</td> <td>$5-j4$</td> </tr> <tr> <td>$\underline{Z}_N, \text{ Ом}$</td> <td>2</td> </tr> </table>	$E, \text{ В}$	220	$\varphi, \text{ градус}$	30	$\underline{Z}_A, \text{ Ом}$	$5-j4$	$\underline{Z}_B, \text{ Ом}$	$5-j4$	$\underline{Z}_C, \text{ Ом}$	$5-j4$	$\underline{Z}_N, \text{ Ом}$	2
$E, \text{ В}$	220												
$\varphi, \text{ градус}$	30												
$\underline{Z}_A, \text{ Ом}$	$5-j4$												
$\underline{Z}_B, \text{ Ом}$	$5-j4$												
$\underline{Z}_C, \text{ Ом}$	$5-j4$												
$\underline{Z}_N, \text{ Ом}$	2												
	<p>Симетричний трифазний генератор ЕРС (з'єднання зірка) з</p> <table border="0"> <tr> <td>$E, \text{ В}$</td> <td>220</td> </tr> <tr> <td>$\varphi, \text{ градус}$</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>$\underline{Z}_A, \text{ Ом}$</td> <td>$10+j4$</td> </tr> <tr> <td>$\underline{Z}_B, \text{ Ом}$</td> <td>$10+j4$</td> </tr> </table>	$E, \text{ В}$	220	$\varphi, \text{ градус}$	0	$\underline{Z}_A, \text{ Ом}$	$10+j4$	$\underline{Z}_B, \text{ Ом}$	$10+j4$				
$E, \text{ В}$	220												
$\varphi, \text{ градус}$	0												
$\underline{Z}_A, \text{ Ом}$	$10+j4$												
$\underline{Z}_B, \text{ Ом}$	$10+j4$												
<p style="text-align: center;">Варіант №5</p> <p>Завдання:</p> <ol style="list-style-type: none"> Розрахувати струми у кожній фазі та напругу зміщення нейтралі, лінійні напруги генератора, фазну та лінійну напруги навантаження. Визначити активну потужність за допомогою показів ватметрів. Побудувати суміщену векторну діаграму струмів та діаграму напруг. 	<p>Симетричний трифазний генератор ЕРС (з'єднання зірка) з</p> <table border="0"> <tr> <td>$E, \text{ В}$</td> <td>220</td> </tr> <tr> <td>$\varphi, \text{ градус}$</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>$\underline{Z}_A, \text{ Ом}$</td> <td>$10+j4$</td> </tr> <tr> <td>$\underline{Z}_B, \text{ Ом}$</td> <td>$10+j4$</td> </tr> </table>	$E, \text{ В}$	220	$\varphi, \text{ градус}$	0	$\underline{Z}_A, \text{ Ом}$	$10+j4$	$\underline{Z}_B, \text{ Ом}$	$10+j4$				
$E, \text{ В}$	220												
$\varphi, \text{ градус}$	0												
$\underline{Z}_A, \text{ Ом}$	$10+j4$												
$\underline{Z}_B, \text{ Ом}$	$10+j4$												

	$\underline{Z}_C, \text{ Ом}$ $10+j4$
<p style="text-align: center;">Варіант №6</p> <p>Завдання:</p> <ol style="list-style-type: none"> Розрахувати струми у кожній фазі, лінійні напруги генератора, фазну та лінійну напруги навантаження. Визначити активну потужність за допомогою показів ватметрів. Побудувати суміщену векторну діаграму струмів та діаграму напруг. 	<p>Симетричний трифазний генератор ЕРС (з'єднання трикутник)</p> <p>$E, \text{ В}$ 220 $\varphi, \text{ градус}$ 30</p> <p>$\underline{Z}_A, \text{ Ом}$ $10-j10$</p>
	<p>$\underline{Z}_B, \text{ Ом}$ $10-j10$ $\underline{Z}_C, \text{ Ом}$ $10-j10$</p>
<p style="text-align: center;">Варіант №7</p> <p>Завдання:</p> <ol style="list-style-type: none"> Розрахувати струми у кожній фазі та нульовому проводі, лінійні напруги генератора, фазну та лінійну напруги навантаження. Визначити активну потужність за допомогою показів ватметрів. Побудувати суміщену векторну діаграму струмів та діаграму напруг. 	<p>Симетричний трифазний генератор ЕРС (з'єднання зірка) з</p> <p>$E, \text{ В}$ 220 $\varphi, \text{ градус}$ 90</p> <p>$\underline{Z}_A, \text{ Ом}$ 10 $\underline{Z}_B, \text{ Ом}$ 10</p>

	$Z_C, \text{ Ом}$ 10 $Z_N, \text{ Ом}$ 0.5
<p style="text-align: center;">Варіант №8</p> <p>Завдання:</p> <ol style="list-style-type: none"> Розрахувати струми у кожній фазі та напругу зміщення нейтралі, лінійні напруги генератора, фазну та лінійну напруги навантаження. Визначити активну потужність за допомогою показів ватметрів. Побудувати суміщену векторну діаграму струмів та діаграму напруг. 	<p>Симетричний трифазний генератор ЕРС (з'єднання зірка) з</p> $E, \text{ В}$ 220 $\phi, \text{ градус}$ 30
	$Z_A, \text{ Ом}$ 10 $Z_B, \text{ Ом}$ 10 $Z_C, \text{ Ом}$ 10
<p style="text-align: center;">Варіант №9</p> <p>Завдання:</p> <ol style="list-style-type: none"> Розрахувати струми у кожній фазі, лінійні напруги генератора, фазну та лінійну напруги навантаження. Визначити активну потужність за допомогою показів ватметрів. Побудувати суміщену векторну діаграму струмів та діаграму напруг. 	<p>Симетричний трифазний генератор ЕРС (з'єднання трикутник)</p> $E, \text{ В}$ 220 $\phi, \text{ градус}$ 60

	$\underline{Z}_A, \text{ Ом}$ 20 $\underline{Z}_B, \text{ Ом}$ 20 $\underline{Z}_C, \text{ Ом}$ 20
<p style="text-align: center;">Варіант №10</p> <p>Завдання:</p> <ol style="list-style-type: none"> Розрахувати струми у кожній фазі та нульовому проводі, лінійні напруги генератора, фазну та лінійну напруги навантаження. Визначити активну потужність за допомогою показів ватметрів. Побудувати суміщену векторну діаграму струмів та діаграму напруг. 	<p>Симетричний трифазний генератор ЕРС (з'єднання зірка) з</p> $E, \text{ В}$ 220 $\varphi, \text{ градус}$ 0 $\underline{Z}_A, \text{ Ом}$ $j10$ $\underline{Z}_B, \text{ Ом}$ $j10$ $\underline{Z}_C, \text{ Ом}$ $j10$ $\underline{Z}_N, \text{ Ом}$ 0
	<p style="text-align: center;">Варіант №11</p> <p>Завдання:</p> <ol style="list-style-type: none"> Розрахувати струми у кожній фазі та напругу зміщення нейтралі, лінійні напруги генератора, фазну та лінійну напруги навантаження. Визначити активну потужність за допомогою показів ватметрів. Побудувати суміщену векторну діаграму струмів та діаграму напруг.
<p>Симетричний трифазний генератор ЕРС (з'єднання зірка) з</p> $E, \text{ В}$ 220 $\varphi, \text{ градус}$ 0 $\underline{Z}_A, \text{ Ом}$ $-j10$ $\underline{Z}_B, \text{ Ом}$ $-j10$	

	$\underline{Z}_C, \text{ Ом} \quad -j10$
<p style="text-align: center;">Варіант №12</p> <p>Завдання:</p> <ol style="list-style-type: none"> Розрахувати струми у кожній фазі, лінійні напруги генератора, фазну та лінійну напруги навантаження. Визначити активну потужність за допомогою показів ватметрів. Побудувати суміщену векторну діаграму струмів та діаграму напруг. 	<p>Симетричний трифазний генератор ЕРС (з'єднання трикутник)</p> <p>$E, \text{ В} \quad 220$ $\varphi, \text{ градус} \quad 45$</p> <p>$\underline{Z}_A, \text{ Ом} \quad j10$</p>
	<p>$\underline{Z}_B, \text{ Ом} \quad j10$ $\underline{Z}_C, \text{ Ом} \quad j10$</p>
<p style="text-align: center;">Варіант №13</p> <p>Завдання:</p> <ol style="list-style-type: none"> Розрахувати струми у кожній фазі та нульовому проводі, лінійні напруги генератора, фазну та лінійну напруги навантаження. Визначити активну потужність за допомогою показів ватметрів. Побудувати суміщену векторну діаграму струмів та діаграму напруг. 	<p>Симетричний трифазний генератор ЕРС (з'єднання зірка) з</p> <p>$E, \text{ В} \quad 220$ $\varphi, \text{ градус} \quad 10$</p> <p>$\underline{Z}_A, \text{ Ом} \quad -j50$ $\underline{Z}_B, \text{ Ом} \quad -j50$</p>



$Z_C, \text{ Ом} \quad -j50$
 $Z_N, \text{ Ом} \quad 0.5$

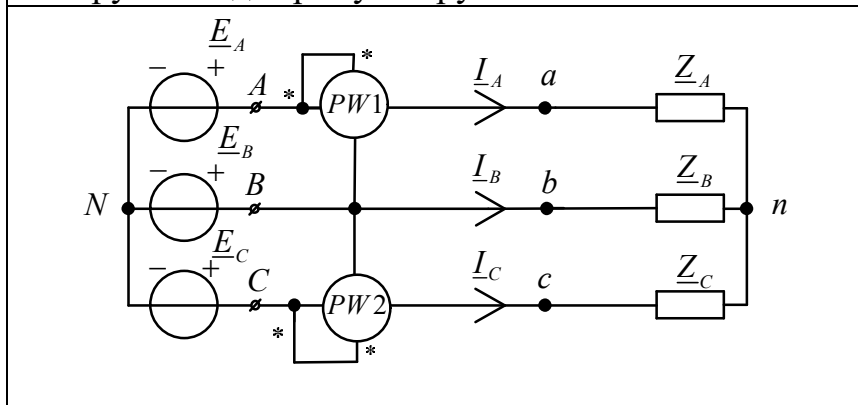
Варіант №14

Завдання:

1. Розрахувати струми у кожній фазі та напругу зміщення нейтралі, лінійні напруги генератора, фазну та лінійну напруги навантаження.
2. Визначити активну потужність за допомогою показів ватметрів.
3. Побудувати суміщену векторну діаграму струмів та діаграму напруг.

Симетричний трифазний генератор ЕРС (з'єднання зірка) з

$E, \text{ В} \quad 220$
 $\phi, \text{ градус} \quad 30$
 $Z_A, \text{ Ом} \quad j20$
 $Z_B, \text{ Ом} \quad j20$
 $Z_C, \text{ Ом} \quad j20$



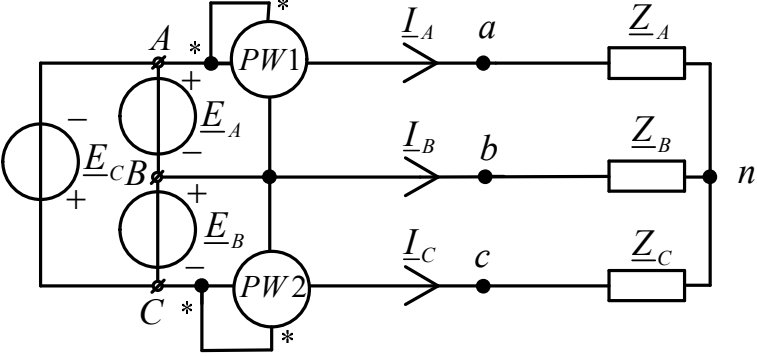
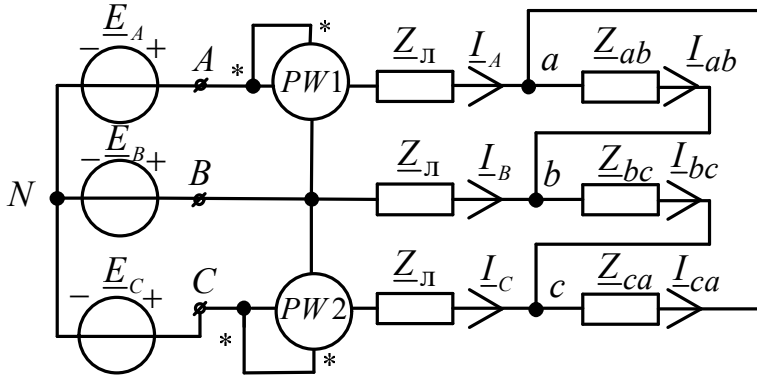
Варіант №15

Завдання:

1. Розрахувати струми у кожній фазі, лінійні напруги генератора, фазну та лінійну напруги навантаження.
2. Визначити активну потужність за допомогою показів ватметрів.
3. Побудувати суміщену векторну діаграму струмів та діаграму напруг.

Симетричний трифазний генератор ЕРС (з'єднання трикутник)

$E, \text{ В} \quad 220$
 $\phi, \text{ градус} \quad 0$

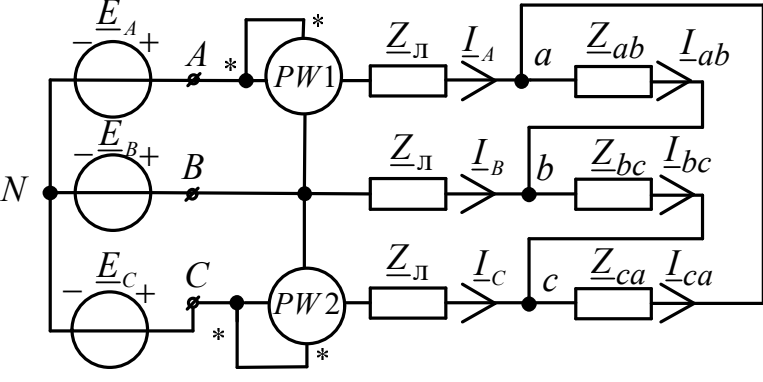
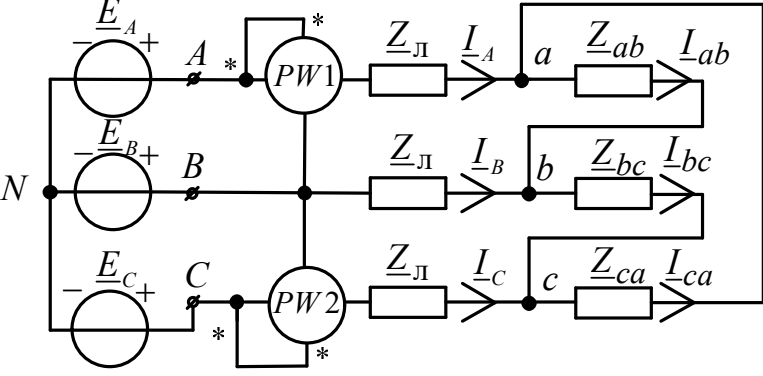
	$Z_A, \text{ Ом} \quad -j30$ $Z_B, \text{ Ом} \quad -j30$ $Z_C, \text{ Ом} \quad -j30$
<p style="text-align: center;">Варіант №16</p> <p>Завдання:</p> <ol style="list-style-type: none"> Розрахувати струми у кожній фазі джерела на навантаження, лінійні та фазні напруги генератора та споживача. Визначити активну потужність за допомогою показів ватметрів. Побудувати суміщену векторну діаграму струмів та діаграму напруг. 	<p>Симетричний трифазний генератор ЕРС (з'єднання зірка)</p> $U_{AB}, \text{ В} \quad 200$ $\varphi, \text{ градус} \quad 0$ $Z_{ab}, \text{ Ом} \quad 5+j12$ $Z_{bc}, \text{ Ом} \quad 5+j12$ $Z_{ca}, \text{ Ом} \quad 5+j12$ $Z_{\text{л}}, \text{ Ом} \quad 1+j2$
	
<p style="text-align: center;">Варіант №17</p> <p>Завдання:</p> <ol style="list-style-type: none"> Розрахувати струми у кожній фазі джерела на навантаження, лінійні та фазні напруги генератора та споживача. Визначити активну потужність за допомогою показів ватметрів. Побудувати суміщену векторну діаграму струмів та діаграму напруг. 	<p>Симетричний трифазний генератор ЕРС (з'єднання зірка)</p> $U_{AB}, \text{ В} \quad 200$ $\varphi, \text{ градус} \quad -30$ $Z_{ab}, \text{ Ом} \quad 5-j12$ $Z_{bc}, \text{ Ом} \quad 5-j12$

	$Z_{ca}, \text{ Ом} \quad 5-j12$ $Z_{\text{л}}, \text{ Ом} \quad 1+j2$
<p style="text-align: center;">Варіант №18</p> <p>Завдання:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Розрахувати струми у кожній фазі джерела на навантаження, лінійні та фазні напруги генератора та споживача. 2. Визначити активну потужність за допомогою показів ватметрів. 3. Побудувати суміщену векторну діаграму струмів та діаграму напруг. 	<p>Симетричний трифазний генератор ЕРС (з'єднання зірка)</p> $U_{AB}, \text{ В} \quad 200$ $\varphi, \text{ градус} \quad 30$ $Z_{ab}, \text{ Ом} \quad 2+j12$ $Z_{bc}, \text{ Ом} \quad 2+j12$ $Z_{ca}, \text{ Ом} \quad 2+j12$ $Z_{\text{л}}, \text{ Ом} \quad 1-j2$
	<p>Симетричний трифазний генератор ЕРС (з'єднання зірка)</p> $U_{AB}, \text{ В} \quad 180$ $\varphi, \text{ градус} \quad 10$ $Z_{ab}, \text{ Ом} \quad 50+j12$
<p style="text-align: center;">Варіант №19</p> <p>Завдання:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Розрахувати струми у кожній фазі джерела на навантаження, лінійні та фазні напруги генератора та споживача. 2. Визначити активну потужність за допомогою показів ватметрів. 3. Побудувати суміщену векторну діаграму струмів та діаграму напруг. 	

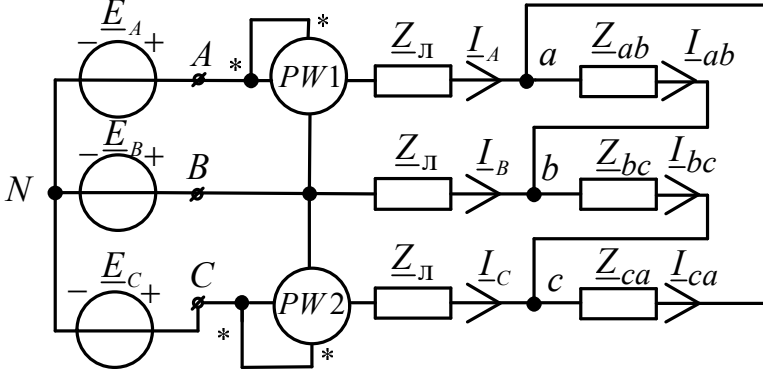
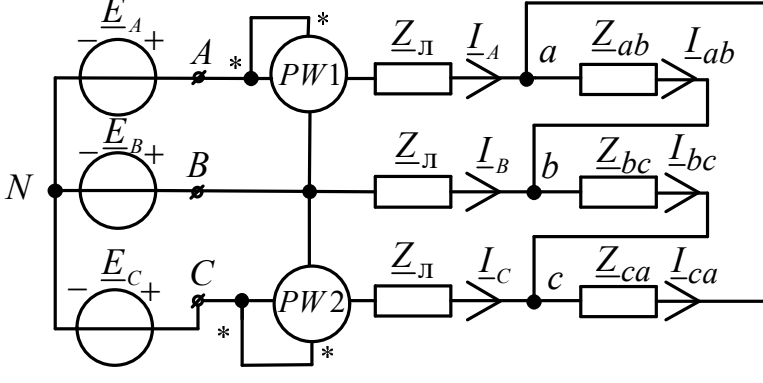
	$\underline{Z}_{bc}, \text{ Ом} \quad 50+j12$ $\underline{Z}_{ca}, \text{ Ом} \quad 50+j12$ $\underline{Z}_{Л}, \text{ Ом} \quad 1+j2$
<p style="text-align: center;">Варіант №20</p> <p>Завдання:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Розрахувати струми у кожній фазі джерела на навантаження, лінійні та фазні напруги генератора та споживача. 2. Визначити активну потужність за допомогою показів ватметрів. 3. Побудувати суміщену векторну діаграму струмів та діаграму напруг. 	<p>Симетричний трифазний генератор ЕРС (з'єднання зірка)</p> $U_{AB}, \text{ В} \quad 200$ $\varphi, \text{ градус} \quad 60$ $\underline{Z}_{ab}, \text{ Ом} \quad 5-j20$ $\underline{Z}_{bc}, \text{ Ом} \quad 5-j20$ $\underline{Z}_{ca}, \text{ Ом} \quad 5-j20$ $\underline{Z}_{Л}, \text{ Ом} \quad 2$
	<p>Симетричний трифазний генератор ЕРС (з'єднання зірка)</p> $U_{AB}, \text{ В} \quad 200$ $\varphi, \text{ градус} \quad 45$ $\underline{Z}_{ab}, \text{ Ом} \quad 20+j12$
<p style="text-align: center;">Варіант №21</p> <p>Завдання:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Розрахувати струми у кожній фазі джерела на навантаження, лінійні та фазні напруги генератора та споживача. 2. Визначити активну потужність за допомогою показів ватметрів. 3. Побудувати суміщену векторну діаграму струмів та діаграму напруг. 	

	$\underline{Z}_{bc}, \text{ Ом} \quad 20+j12$ $\underline{Z}_{ca}, \text{ Ом} \quad 20+j12$ $\underline{Z}_{\text{Л}}, \text{ Ом} \quad 1+j2$
<p style="text-align: center;">Варіант №22</p> <p>Завдання:</p> <ol style="list-style-type: none"> Розрахувати струми у кожній фазі джерела на навантаження, лінійні та фазні напруги генератора та споживача. Визначити активну потужність за допомогою показів ватметрів. Побудувати суміщену векторну діаграму струмів та діаграму напруг. 	<p>Симетричний трифазний генератор ЕРС (з'єднання зірка)</p> $U_{AB}, \text{ В} \quad 200$ $\varphi, \text{ градус} \quad 120$ $\underline{Z}_{ab}, \text{ Ом} \quad 10$ $\underline{Z}_{bc}, \text{ Ом} \quad 10$ $\underline{Z}_{ca}, \text{ Ом} \quad 10$ $\underline{Z}_{\text{Л}}, \text{ Ом} \quad 1+j2$
	<p style="text-align: center;">Варіант №23</p> <p>Завдання:</p> <ol style="list-style-type: none"> Розрахувати струми у кожній фазі джерела на навантаження, лінійні та фазні напруги генератора та споживача. Визначити активну потужність за допомогою показів ватметрів. Побудувати суміщену векторну діаграму струмів та діаграму напруг.
	<p>Симетричний трифазний генератор ЕРС (з'єднання зірка)</p> $U_{AB}, \text{ В} \quad 160$ $\varphi, \text{ градус} \quad 90$ $\underline{Z}_{ab}, \text{ Ом} \quad j40$

	$Z_{bc}, \text{ Ом} \quad j40$ $Z_{ca}, \text{ Ом} \quad j40$ $Z_L, \text{ Ом} \quad 1-j4$
<p style="text-align: center;">Варіант №24</p> <p>Завдання:</p> <ol style="list-style-type: none"> Розрахувати струми у кожній фазі джерела на навантаження, лінійні та фазні напруги генератора та споживача. Визначити активну потужність за допомогою показів ватметрів. Побудувати суміщену векторну діаграму струмів та діаграму напруг. 	<p>Симетричний трифазний генератор ЕРС (з'єднання зірка)</p> $U_{AB}, \text{ В} \quad 140$ $\varphi, \text{ градус} \quad 120$ $Z_{ab}, \text{ Ом} \quad -j40$ $Z_{bc}, \text{ Ом} \quad -j40$ $Z_{ca}, \text{ Ом} \quad -j40$ $Z_L, \text{ Ом} \quad 1$
	<p>Симетричний трифазний генератор ЕРС (з'єднання зірка)</p> $U_{AB}, \text{ В} \quad 160$ $\varphi, \text{ градус} \quad 150$ $Z_{ab}, \text{ Ом} \quad 20+j10$
<p style="text-align: center;">Варіант №25</p> <p>Завдання:</p> <ol style="list-style-type: none"> Розрахувати струми у кожній фазі джерела на навантаження, лінійні та фазні напруги генератора та споживача. Визначити активну потужність за допомогою показів ватметрів. Побудувати суміщену векторну діаграму струмів та діаграму напруг. 	

	$\underline{Z}_{bc}, \text{ Ом} \quad 20+j10$ $\underline{Z}_{ca}, \text{ Ом} \quad 20+j10$ $\underline{Z}_L, \text{ Ом} \quad j5$
<p style="text-align: center;">Варіант №26</p> <p>Завдання:</p> <ol style="list-style-type: none"> Розрахувати струми у кожній фазі джерела на навантаження, лінійні та фазні напруги генератора та споживача. Визначити активну потужність за допомогою показів ватметрів. Побудувати суміщену векторну діаграму струмів та діаграму напруг. 	<p>Симетричний трифазний генератор ЕРС (з'єднання зірка)</p> $U_{AB}, \text{ В} \quad 120$ $\varphi, \text{ градус} \quad 180$ $\underline{Z}_{ab}, \text{ Ом} \quad 20-j10$ $\underline{Z}_{bc}, \text{ Ом} \quad 20-j10$ $\underline{Z}_{ca}, \text{ Ом} \quad 20-j10$ $\underline{Z}_L, \text{ Ом} \quad j5$
	$\underline{Z}_{bc}, \text{ Ом} \quad 20-j10$ $\underline{Z}_{ca}, \text{ Ом} \quad 20-j10$ $\underline{Z}_L, \text{ Ом} \quad j5$
<p style="text-align: center;">Варіант №27</p> <p>Завдання:</p> <ol style="list-style-type: none"> Розрахувати струми у кожній фазі джерела на навантаження, лінійні та фазні напруги генератора та споживача. Визначити активну потужність за допомогою показів ватметрів. Побудувати суміщену векторну діаграму струмів та діаграму напруг. 	<p>Симетричний трифазний генератор ЕРС (з'єднання зірка)</p> $U_{AB}, \text{ В} \quad 160$ $\varphi, \text{ градус} \quad 210$ $\underline{Z}_{ab}, \text{ Ом} \quad 30+j10$ $\underline{Z}_{bc}, \text{ Ом} \quad 30+j10$

	$Z_{ca}, \text{ Ом} \quad 30+j10$ $Z_L, \text{ Ом} \quad 5$
<p style="text-align: center;">Варіант №28</p> <p>Завдання:</p> <ol style="list-style-type: none"> Розрахувати струми у кожній фазі джерела на навантаження, лінійні та фазні напруги генератора та споживача. Визначити активну потужність за допомогою показів ватметрів. Побудувати суміщену векторну діаграму струмів та діаграму напруг. 	<p>Симетричний трифазний генератор ЕРС (з'єднання зірка)</p> $U_{AB}, \text{ В} \quad 180$ $\phi, \text{ градус} \quad 240$ $Z_{ab}, \text{ Ом} \quad j10$ $Z_{bc}, \text{ Ом} \quad j10$ $Z_{ca}, \text{ Ом} \quad j10$ $Z_L, \text{ Ом} \quad 2$
	<p>Симетричний трифазний генератор ЕРС (з'єднання зірка)</p> $U_{AB}, \text{ В} \quad 200$ $\phi, \text{ градус} \quad 270$ $Z_{ab}, \text{ Ом} \quad 10-j10$
<p style="text-align: center;">Варіант №29</p> <p>Завдання:</p> <ol style="list-style-type: none"> Розрахувати струми у кожній фазі джерела на навантаження, лінійні та фазні напруги генератора та споживача. Визначити активну потужність за допомогою показів ватметрів. Побудувати суміщену векторну діаграму струмів та діаграму напруг. 	

	$\underline{Z}_{bc}, \text{ Ом} \quad 10-j10$ $\underline{Z}_{ca}, \text{ Ом} \quad 10-j10$ $\underline{Z}_L, \text{ Ом} \quad -j5$
<p style="text-align: center;">Варіант №30</p> <p>Завдання:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Розрахувати струми у кожній фазі джерела на навантаження, лінійні та фазні напруги генератора та споживача. 2. Визначити активну потужність за допомогою показів ватметрів. 3. Побудувати суміщену векторну діаграму струмів та діаграму напруг. 	<p>Симетричний трифазний генератор ЕРС (з'єднання зірка)</p> $U_{AB}, \text{ В} \quad 200$ $\varphi, \text{ градус} \quad 0$ $\underline{Z}_{ab}, \text{ Ом} \quad 100-j10$ $\underline{Z}_{bc}, \text{ Ом} \quad 100-j10$ $\underline{Z}_{ca}, \text{ Ом} \quad 100-j10$
	$\underline{Z}_L, \text{ Ом} \quad 4+j20$

Практичне заняття №2 Розрахунок несиметричного трифазного кола при з'єднанні споживачів зіркою і трикутником

Розрахунок несиметричного трифазного кола при з'єднанні споживачів зіркою: а) з нейтральним проводом; б) без нейтрального проводу. Розрахунок несиметричного трифазного кола при з'єднанні споживачів трикутником. Побудова векторних діаграм напруг та струмів. Використання методу еквівалентних перетворень для спрощення 3-фазного кола. Розрахунок спрощеного кола та знаходження струмів і напруг у вихідній схемі. Складання балансу потужностей 3-фазного кола, побудова суміщених векторних діаграм.

Задача 1

До симетричного трифазного генератора з фазним ЕРС $E=230$ (В) та внутрішнім опором $Z_0=0.3+j0.9$ (Ом) підключено несиметричне навантаження, що з'єднане у зірку з нульовим проводом (рис. 2.1.1). Опори фаз навантаження дорівнюють: $Z_A=2+j4$, $Z_B=4-j8$ та $Z_C=5$ (Ом). Опір нульового проводу має значення $Z_N=0.5$ (Ом), а опір лінії $Z_{\pi}=0.4+j0.3$ (Ом).

Визначити струми у кожній фазі навантаження та генератора під час наявності нульового проводу та при обриві його. Побудувати векторну діаграму для кожного випадку [1].

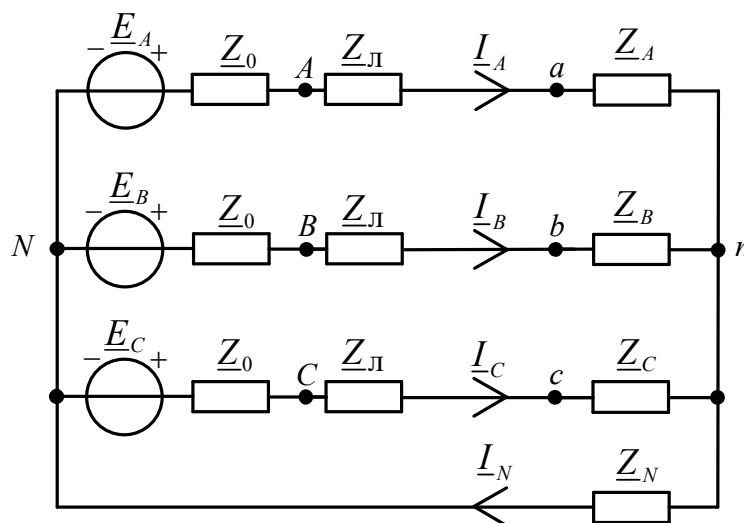


Рисунок 2.1.1 – Схема трифазного електричного кола

Рішення

Запишемо значення фазних ЕРС генератора у комплексному вигляді:

$$\begin{aligned}\underline{E}_A &= Ee^{j0} = 230 \text{ (В)}; \\ \underline{E}_B &= \underline{E}_A e^{-j120^\circ} = 230e^{-j120^\circ} \text{ (В)}; \\ \underline{E}_C &= \underline{E}_A e^{j120^\circ} = 230e^{j120^\circ} \text{ (В)}.\end{aligned}\tag{2.1.1}$$

Знайдемо значення провідностей окремих фаз та нейтрального проводу:

$$\begin{aligned}\underline{Y}_A &= \frac{1}{\underline{Z}_A + \underline{Z}_\Pi + \underline{Z}_0} = 0.079 - j0.15 = 0.171 \angle -62.56^\circ \text{ (См)}; \\ \underline{Y}_B &= \frac{1}{\underline{Z}_B + \underline{Z}_\Pi + \underline{Z}_0} = 0.069 + j0.1 = 0.121 \angle 55.349^\circ \text{ (См)}; \\ \underline{Y}_C &= \frac{1}{\underline{Z}_C + \underline{Z}_\Pi + \underline{Z}_0} = 0.168 - j0.035 = 0.172 \angle -11.889^\circ \text{ (См)}; \\ \underline{Y}_N &= \frac{1}{\underline{Z}_N} = \frac{1}{0.5} = 2 \text{ (См)}.\end{aligned}\tag{2.1.2}$$

Значення напруги між нейтральними вузлами споживача та генератора визначається

$$\begin{aligned}\underline{U}_{nN} &= \frac{\underline{Y}_A \underline{E}_A + \underline{Y}_B \underline{E}_B + \underline{Y}_C \underline{E}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C + \underline{Y}_N} = 8.01 - j9.396 = \\ &= 12.347 \angle -49.551^\circ \text{ (В)}.\end{aligned}\tag{2.1.3}$$

Значення фазних струмів визначаються за формулами:

$$\begin{aligned}\underline{I}_A &= (\underline{E}_A - \underline{U}_{nN}) \underline{Y}_A = 18.882 - j32.886 = 37.921 \angle -60.137^\circ \text{ (А)}; \\ \underline{I}_B &= (\underline{E}_B - \underline{U}_{nN}) \underline{Y}_B = 10.426 - j25.296 = 27.361 \angle -67.6^\circ \text{ (А)}; \\ \underline{I}_C &= (\underline{E}_C - \underline{U}_{nN}) \underline{Y}_C = -13.288 + j39.391 = 41.572 \angle 108.641^\circ \text{ (А)}; \\ \underline{I}_N &= (\underline{U}_{nN}) \underline{Y}_N = 16.021 - j18.791 = 24.694 \angle -49.551^\circ \text{ (А)}.\end{aligned}\tag{2.1.4}$$

Визначимо напруги на ділянках трифазного кола:

$$\begin{aligned}\underline{U}_{an} &= \underline{I}_A \underline{Z}_A = 169.309 + j9.757 = 169.59 \angle 3.298^\circ (\text{В}); \\ \underline{U}_{bn} &= \underline{I}_B \underline{Z}_B = -160.664 - j184.594 = 244.72 \angle -131.035^\circ (\text{В}); \\ \underline{U}_{cn} &= \underline{I}_C \underline{Z}_C = -66.44 + j196.954 = 207.858 \angle 108.641^\circ (\text{В});\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\underline{U}_{Aa} &= \underline{I}_A \underline{Z}_{\Pi} = 17.419 - j7.49 = 18.961 \angle -23.267^\circ (\text{В}); \\ \underline{U}_{Bb} &= \underline{I}_B \underline{Z}_{\Pi} = 11.759 - j6.991 = 13.68 \angle -30.73^\circ (\text{В}); \\ \underline{U}_{Cc} &= \underline{I}_C \underline{Z}_{\Pi} = -17.132 + j11.77 = 20.786 \angle 145.511^\circ (\text{В});\end{aligned} \quad (2.1.5)$$

$$\begin{aligned}\underline{U}_{A0} &= \underline{I}_A \underline{Z}_0 = 35.262 + j7.128 = 35.975 \angle 11.428^\circ (\text{В}); \\ \underline{U}_{B0} &= \underline{I}_B \underline{Z}_0 = 25.894 + j1.795 = 25.956 \angle 3.965^\circ (\text{В}); \\ \underline{U}_{C0} &= \underline{I}_C \underline{Z}_0 = -39.438 - j0.142 = 39.438 \angle -179.794^\circ (\text{В}).\end{aligned}$$

Знайдемо фазну напругу на полюсах генератора:

$$\begin{aligned}\underline{U}_{AN} &= (\underline{E}_A - \underline{U}_{A0}) = 194.738 - j7.128 = 194.868 \angle -2.096^\circ (\text{В}); \\ \underline{U}_{BN} &= (\underline{E}_B - \underline{U}_{B0}) = -140.894 - j200.981 = 245.447 \angle -125.032^\circ (\text{В}); \\ \underline{U}_{CN} &= (\underline{E}_C - \underline{U}_{C0}) = -75.562 + j199.228 = 213.169 \angle 110.761^\circ (\text{В}).\end{aligned} \quad (2.1.6)$$

Лінійна напруга генератора дорівнює:

$$\begin{aligned}\underline{U}_{AB} &= \underline{U}_{AN} - \underline{U}_{BN} = 335.632 + j193.852 = 387.592 \angle 30.01^\circ (\text{В}); \\ \underline{U}_{BC} &= \underline{U}_{BN} - \underline{U}_{CN} = -65.332 - j400.308 = 405.605 \angle -99.269^\circ (\text{В}); \\ \underline{U}_{CA} &= \underline{U}_{CN} - \underline{U}_{AN} = -270.3 + j206.456 = 340.127 \angle 142.627^\circ (\text{В}).\end{aligned} \quad (2.1.7)$$

Складемо баланс потужностей:

$$\begin{aligned}S_{\text{дж}} &= \underline{E}_A \underline{I}_A^* + \underline{E}_B \underline{I}_B^* + \underline{E}_C \underline{I}_C^* = 17560 + j4461 (\text{ВА}); \\ S_{\text{сп}} &= I_A^2 (\underline{Z}_A + \underline{Z}_{\Pi} + \underline{Z}_0) + I_B^2 (\underline{Z}_B + \underline{Z}_{\Pi} + \underline{Z}_0) + \dots \\ &\dots + I_C^2 (\underline{Z}_C + \underline{Z}_{\Pi} + \underline{Z}_0) + I_N^2 \underline{Z}_N = 17560 + j4461 (\text{ВА}).\end{aligned} \quad (2.1.8)$$

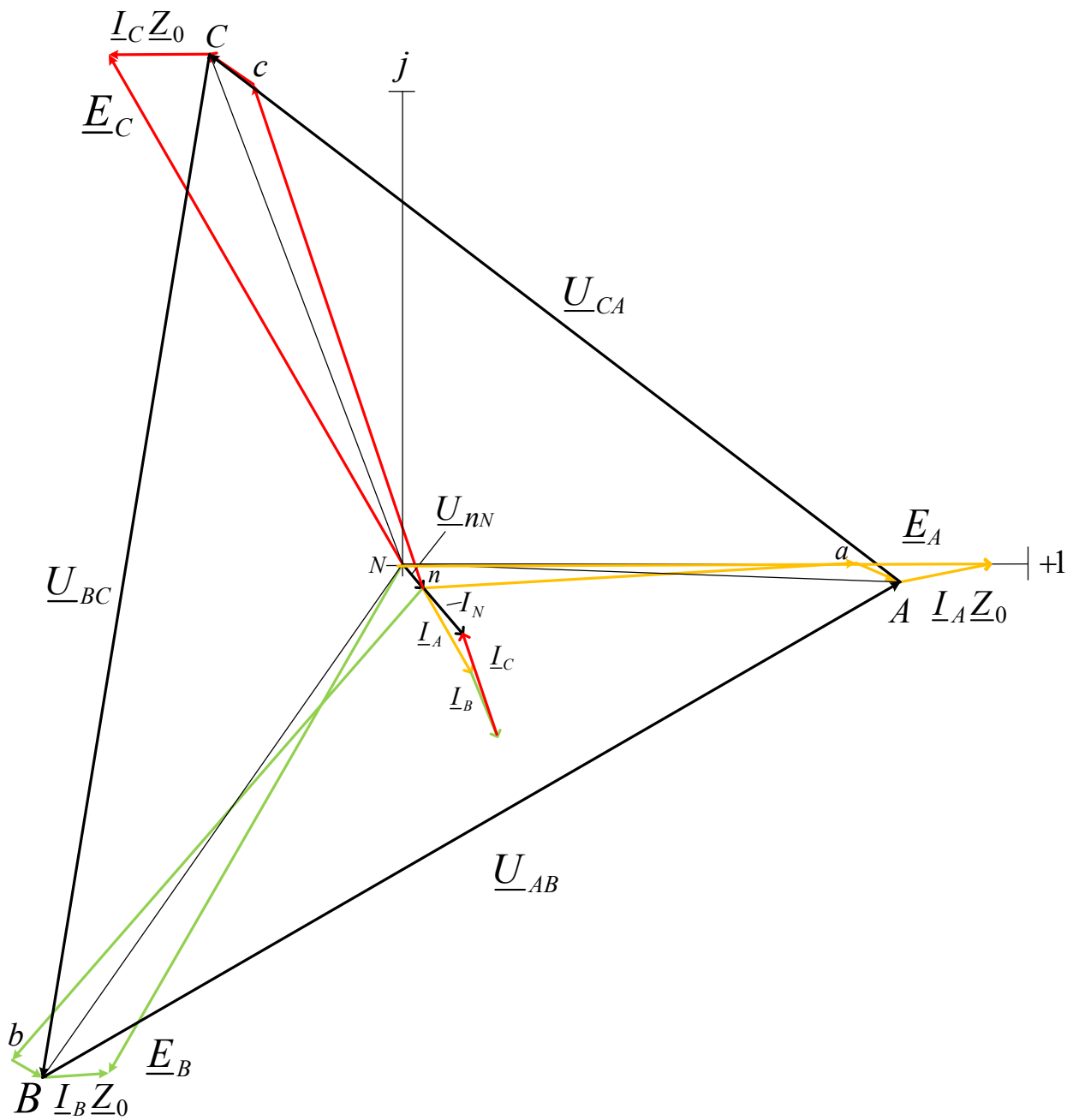


Рисунок 2.1.2 – Векторна діаграма напруг та струмів трифазної несиметричної системи з нульовим проводом

Розглянемо випадок коли нульовий провід відсутній

Напруга між нейтральними вузлами споживача та генератора визначається

$$\begin{aligned}\underline{U}_{nN} &= \frac{\underline{Y}_A \underline{E}_A + \underline{Y}_B \underline{E}_B + \underline{Y}_C \underline{E}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C} = 70.504 - j51.67 = \\ &= 87.411 \angle -36.237^\circ (\text{В}).\end{aligned}\quad (2.1.9)$$

Фазні струми визначаються за формулами:

$$\begin{aligned}\underline{I}_A &= (\underline{E}_A - \underline{U}_{nN}) \underline{Y}_A = 20.371 - j20.095 = 28.614 \angle -44.61^\circ (\text{А}); \\ \underline{I}_B &= (\underline{E}_B - \underline{U}_{nN}) \underline{Y}_B = 1.921 - j28.607 = 28.672 \angle -86.159^\circ (\text{А}); \\ \underline{I}_C &= (\underline{E}_C - \underline{U}_{nN}) \underline{Y}_C = -22.291 + j53.562 = 53.562 \angle 114.594^\circ (\text{А}).\end{aligned}\quad (2.1.10)$$

Визначимо напруги на ділянках трифазного кола:

$$\begin{aligned}\underline{U}_{an} &= \underline{I}_A \underline{Z}_A = 121.122 + j41.292 = 127.967 \angle 18.825^\circ (\text{В}); \\ \underline{U}_{bn} &= \underline{I}_B \underline{Z}_B = -221.177 - j129.795 = 256.449 \angle -149.594^\circ (\text{В}); \\ \underline{U}_{cn} &= \underline{I}_C \underline{Z}_C = -111.457 + j243.514 = 267.809 \angle 114.594^\circ (\text{В}); \\ \underline{U}_{Aa} &= \underline{I}_A \underline{Z}_\Pi = 14.177 - j1.927 = 14.307 \angle -7.74^\circ (\text{В}); \\ \underline{U}_{Bb} &= \underline{I}_B \underline{Z}_\Pi = 19.351 - j10.867 = 14.336 \angle -49.289^\circ (\text{В}); \\ \underline{U}_{Cc} &= \underline{I}_C \underline{Z}_\Pi = -23.527 + j12.794 = 26.781 \angle 151.464^\circ (\text{В}); \\ \underline{U}_{A0} &= \underline{I}_A \underline{Z}_0 = 24.197 + j12.305 = 27.146 \angle 26.955^\circ (\text{В}); \\ \underline{U}_{B0} &= \underline{I}_B \underline{Z}_0 = 26.323 - j6.854 = 27.201 \angle -14.594^\circ (\text{В}); \\ \underline{U}_{C0} &= \underline{I}_C \underline{Z}_0 = -50.52 - j5.45 = 50.813 \angle -173.841^\circ (\text{В}).\end{aligned}\quad (2.1.11)$$

Знайдемо фазну напругу на полюсах трифазного джерела:

$$\begin{aligned}\underline{U}_{AN} &= (\underline{E}_A - \underline{U}_{A0}) = 205.803 - j12.305 = \\ &= 206.171 \angle -3.422^\circ (\text{В}); \\ \underline{U}_{BN} &= (\underline{E}_B - \underline{U}_{B0}) = -141.323 - j192.332 = \\ &= 238.671 \angle -126.308^\circ (\text{В}); \\ \underline{U}_{CN} &= (\underline{E}_C - \underline{U}_{C0}) = -64.48 + j204.637 = 214.556 \angle 107.489^\circ (\text{В}).\end{aligned}\quad (2.1.12)$$

Лінійна напруга генератора дорівнює:

$$\begin{aligned}\underline{U}_{AB} &= \underline{U}_{AN} - \underline{U}_{BN} = 347.126 + j180.027 = 391.032 \angle 27.412^\circ (\text{В}); \\ \underline{U}_{BC} &= \underline{U}_{BN} - \underline{U}_{CN} = -76.843 - j396.969 = 404.338 \angle -100.955^\circ (\text{В}); \\ \underline{U}_{CA} &= \underline{U}_{CN} - \underline{U}_{AN} = -270.283 + j216.942 = 346.579 \angle 141.248^\circ (\text{В}).\end{aligned}\quad (2.1.13)$$

Складемо баланс комплексних потужностей:

$$\begin{aligned}\underline{S}_{\text{дж}} &= \underline{E}_A \underline{I}_A^* + \underline{E}_B \underline{I}_B^* + \underline{E}_C \underline{I}_C^* = 22430 + j2110 (\text{ВА}); \\ \underline{S}_{\text{сп}} &= I_A^2 (\underline{Z}_A + \underline{Z}_{\text{пр}} + \underline{Z}_0) + I_B^2 (\underline{Z}_B + \underline{Z}_{\text{пр}} + \underline{Z}_0) + \dots \\ &\dots + I_C^2 (\underline{Z}_C + \underline{Z}_{\text{пр}} + \underline{Z}_0) = 22430 + j2110 (\text{ВА}).\end{aligned}\quad (2.1.14)$$

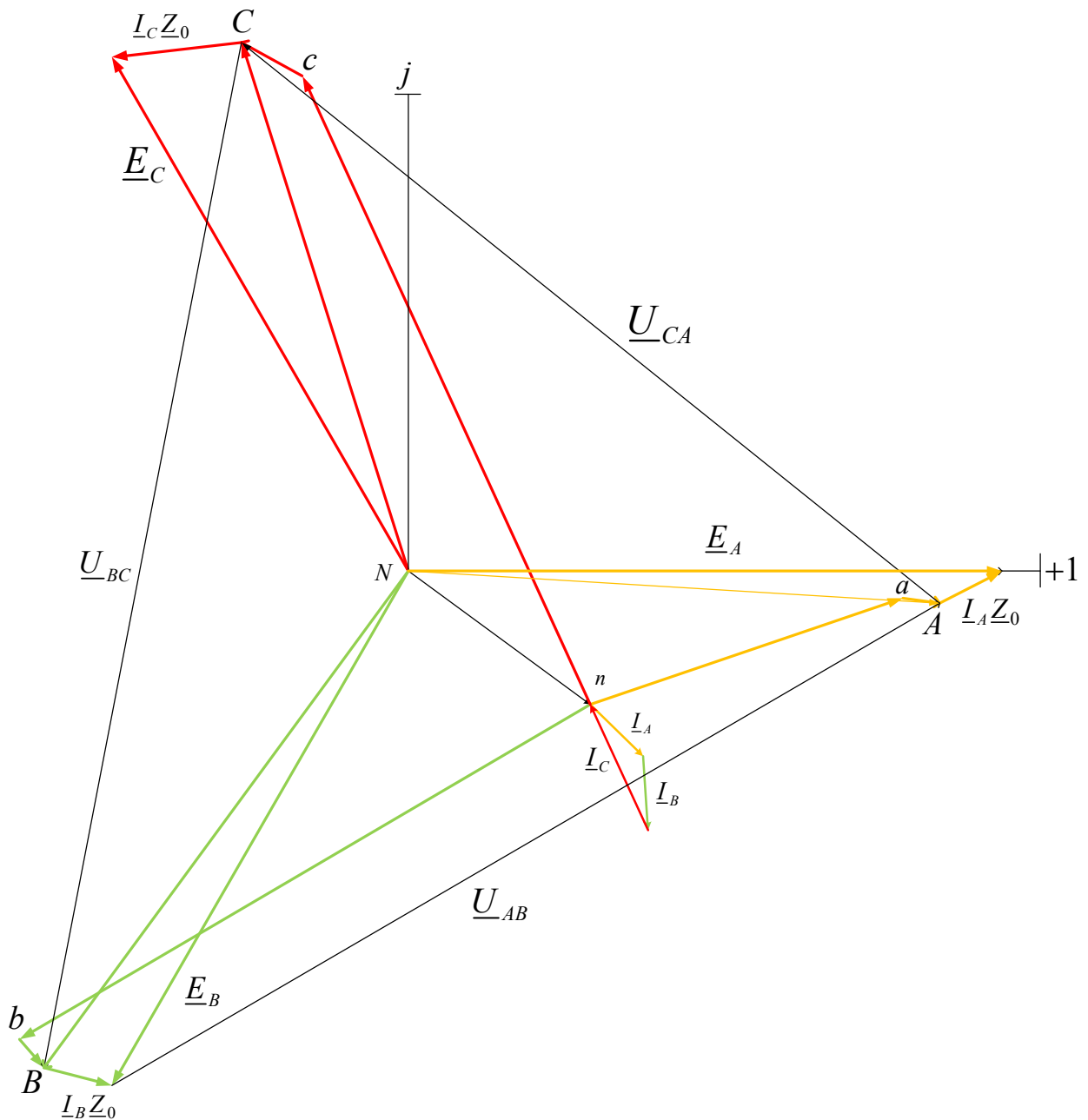


Рисунок 2.1.3 – Векторна діаграма напруг та струмів трифазної несиметричної системи без нульового проводу

Задача 2

До трифазної лінії з симетричним лінійними напругами $U_{\text{л}}=220$ (В) підключено симетричне навантаження за схемою «трикутник» (рис. 2.2.1). Опір кожної фази навантаження дорівнює $Z=10-j10$ (Ом).

Знайти струми в кожній фазі споживача, в лінії та покази ватметрів. Знайти зазначені раніш величини у випадку обриву у точці a_1 . Побудувати векторну діаграму [1].

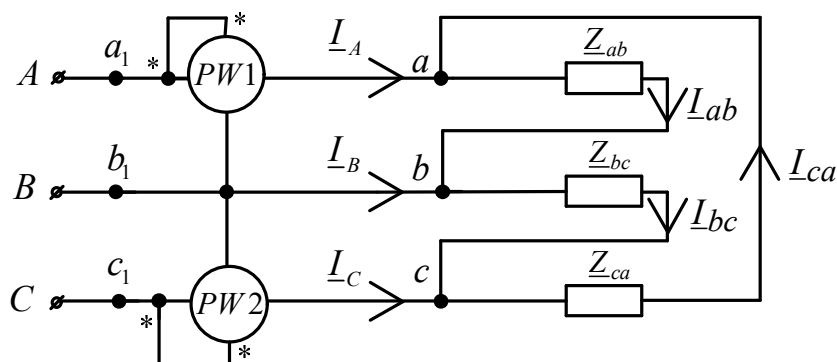


Рисунок 2.2.1 - Електрична схема

Рішення

Запишемо комплекси лінійних напруг:

$$\begin{aligned}\underline{U}_{AB} &= U_{\text{л}} e^{j0} = 220 e^{j0} \text{ (В)}; \\ \underline{U}_{BC} &= U_{\text{л}} e^{-j120^\circ} = 220 e^{-j120^\circ} \text{ (В)}; \\ \underline{U}_{CA} &= U_{\text{л}} e^{j120^\circ} = 220 e^{j120^\circ} \text{ (В)}.\end{aligned}\tag{2.2.1}$$

Під час обриву в точці a_1 визначимо фазні струми та напруги на ділянках трифазного кола

$$\begin{aligned}
\underline{I}_{ab} = \underline{I}_{ca} &= \frac{\underline{U}_{CB}}{2 \cdot \underline{Z}_{ab}} = \frac{-220e^{-j120^\circ}}{20 - j20} = -2.013 + j7.513 = 7.778e^{j105^\circ} \text{ (A)}; \\
\underline{I}_{bc} &= \frac{\underline{U}_{BC}}{\underline{Z}_{bc}} = \frac{220e^{-j120^\circ}}{10 - j10} = 4.026 - j15.026 = 15.556e^{-j75^\circ} \text{ (A)}; \\
\underline{I}_A &= 0; \\
\underline{I}_C = -\underline{I}_B = \underline{I}_{ca} - \underline{I}_{bc} &= (-2.013 + j7.513) - (4.026 - j15.026) = \quad (2.2.2) \\
&= -6.039 + j22.539 = 23.335e^{j105^\circ} \text{ (A)}; \\
\underline{U}_{ab} = \underline{U}_{ca} = \underline{I}_{ab} \cdot \underline{Z}_{ab} &= 7.778e^{j105^\circ} \cdot (10 - j10) = 110e^{j60^\circ} \text{ (B)}; \\
\underline{U}_{Aa} = \underline{U}_{AB} - \underline{I}_{ab} \cdot \underline{Z}_{ab} &= 220e^{j0} - 110e^{j60^\circ} = 190.526e^{j-30^\circ} \text{ (B)}.
\end{aligned}$$

Визначимо покази ватметрів:

$$\begin{aligned}
P_1 &= 0; \\
P_2 &= \operatorname{Re}(-\underline{U}_{BC} \underline{I}_C^*) = \quad (2.2.3) \\
P_2 &= \operatorname{Re}(-220e^{-j120^\circ} \cdot 23.335e^{-j105^\circ}) = 3630 \text{ (Вт)}.
\end{aligned}$$

Складемо баланс потужностей:

$$\begin{aligned}
\underline{S}_{\text{ДЖ}} &= \underline{U}_{ab}^* \underline{I}_{ab} + \underline{U}_{bc}^* \underline{I}_{bc} + \underline{U}_{ca}^* \underline{I}_{ca} = \\
&= \underline{I}_{ab}^* (\underline{U}_{ab} + \underline{U}_{ca}) + \underline{U}_{cb}^* \underline{I}_{bc} = \underline{I}_{ab}^* (\underline{U}_{cb}) + \underline{U}_{bc}^* \underline{I}_{bc} = \\
&= \underline{I}_{ab}^* (\underline{U}_{cb}) + \underline{U}_{cb}^* \underline{I}_{cb} = \\
&= -\underline{I}_{ab}^* \underline{U}_{bc} + \underline{U}_{bc}^* \underline{I}_{bc} = \underline{U}_{bc}^* (\underline{I}_{bc} - \underline{I}_{ab}) = \\
&= \underline{U}_{bc}^* (\underline{I}_B) = \underline{U}_{BC}^* \underline{I}_B = \quad (2.2.4) \\
&= 220 \angle -120^\circ \cdot 23.335 \angle 75^\circ = 3630 - j3630 \text{ (ВА)};
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\underline{S}_{\text{СП}} &= I_{ab}^2 (\underline{Z}_{ab}) + I_{bc}^2 (\underline{Z}_{bc}) + I_{ca}^2 (\underline{Z}_{ca}) = \\
&= 7.778^2 (10 - j10) + 15.556^2 (10 - j10) + \dots \\
&\dots + 7.778^2 (10 - j10) = 3630 - j3630 \text{ (ВА)}.
\end{aligned}$$

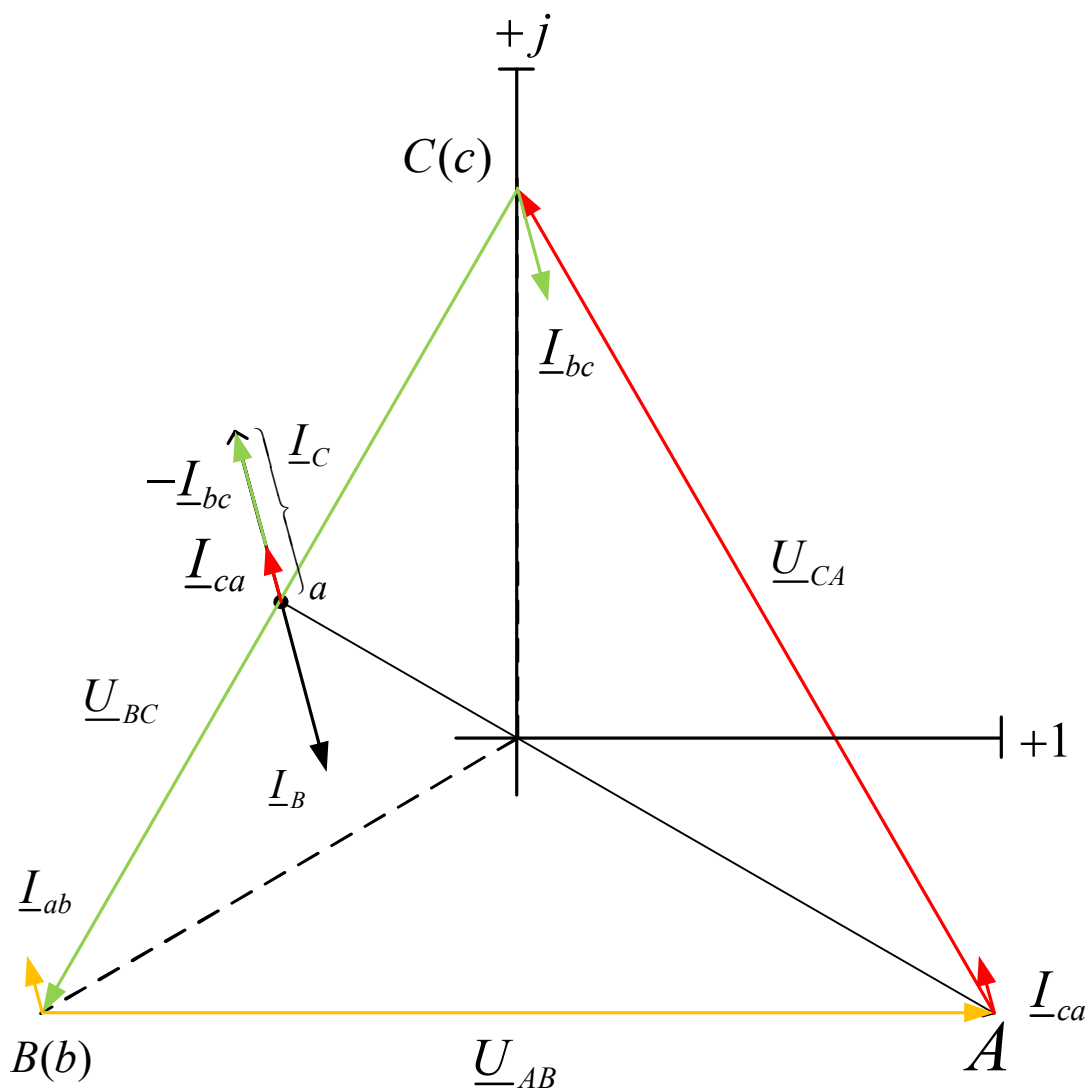


Рисунок 2.2.1 – Векторна діаграма напруг та струмів трифазної несиметричної системи

Задача 3

Розглянемо симетричне трифазне коло, яке представлено на рис. 2.3.1. Задані параметри елементів кола та фазні напруги симетричного трифазного генератора $\underline{U}_A, \underline{U}_B, \underline{U}_C$.

Визначити струми у всіх вітках кола [2] для наступних режимів:

- 1) трифазна система працює у симетричному режимі;
- 2) трифазна система працює у несиметричному режимі (обрив навантаження $\underline{Z}_{A'B'}$).

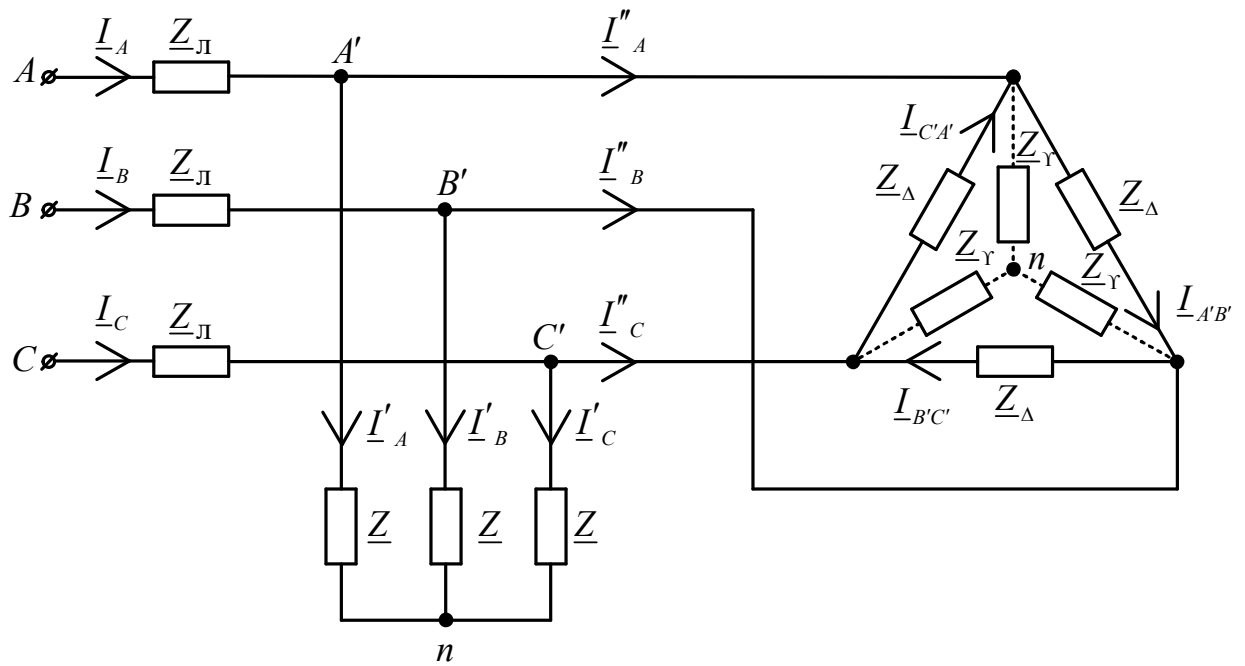


Рисунок 2.3.1 – Схема симетричного трифазного кола

Рішення

Симетричний трикутник перетворюється на еквівалентну симетричну зірку, а схема зводиться до однієї фази A (рис. 2.3.2). Струми та напруги в фазах B та C будуть зсунуті на кути відповідно $\pm 120^\circ$.

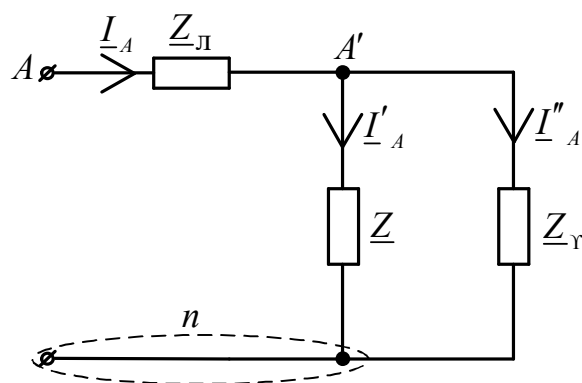


Рисунок 2.3.2 – Схема фази A симетричного трифазного кола

$$\begin{aligned}
\underline{I}_A; \quad \underline{I}'_A; \quad \underline{I}''_A \\
\underline{I}_B = \underline{I}_A a^2; \quad \underline{I}'_B = \underline{I}'_A a^2; \quad \underline{I}''_B = \underline{I}''_A a; \\
\underline{I}_C = \underline{I}_A a; \quad \underline{I}'_C = \underline{I}'_A a; \quad \underline{I}''_C = \underline{I}''_A a. \\
\underline{U}_{A'B'} = (\underline{I}''_A \underline{Z}_Y - \underline{I}''_B \underline{Z}_Y); \\
\underline{I}_{A'B'} = \frac{\underline{U}_{A'B'}}{\underline{Z}_\Delta}; \quad \underline{I}_{B'C'} = \underline{I}_{A'B'} a^2; \quad \underline{I}_{C'A'} = \underline{I}_{A'B'} a.
\end{aligned}
\tag{2.3.1}$$

Для несиметричного кола (**обрив навантаження** $\underline{Z}_{A'B'}$ (рис. 2.3.3)) розрахунок ведеться методом еквівалентного перетворення. Послідовність згортання схеми показано (рис. 2.3.4 – рис. 2.3.7).

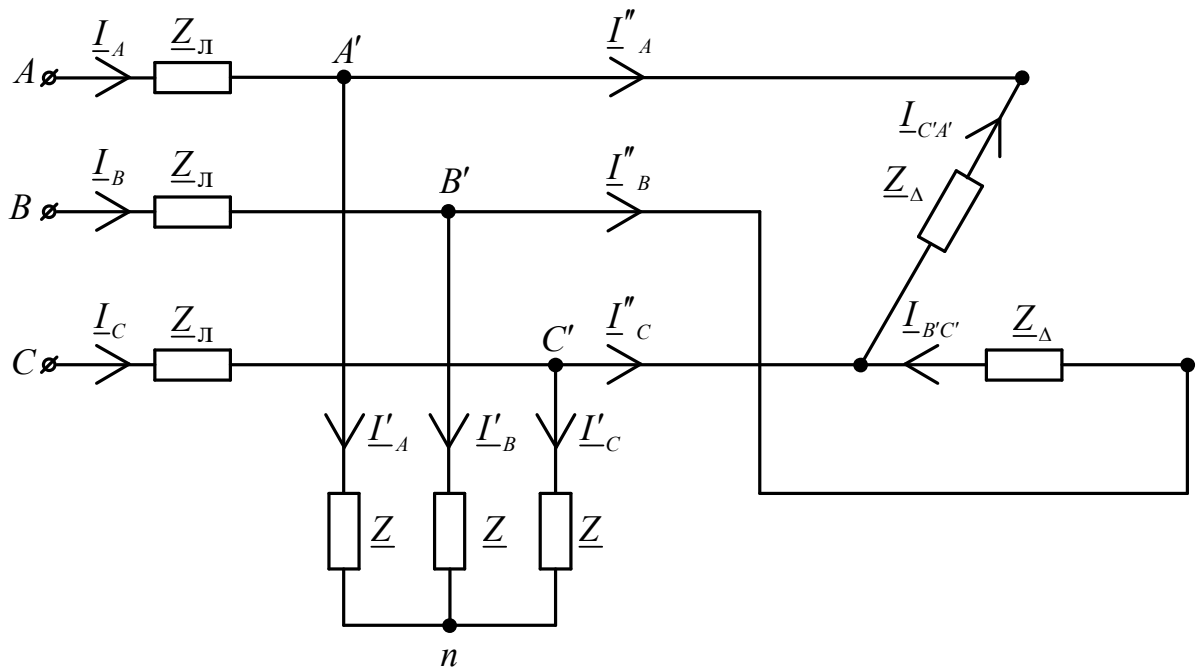


Рисунок 2.3.3 – Електрична схема з виключенням навантаження $\underline{Z}_{A'B'}$

Перетворимо симетричну зірку на еквівалентний симетричний трикутник з опорами \underline{Z}' (рис. 2.3.4). На рис. 2.3.5 показано паралельне з'єднання опорів \underline{Z}'_{II} симетричного трикутника з опорами \underline{Z}_Δ у вітках $C'A'$ та $B'C'$.

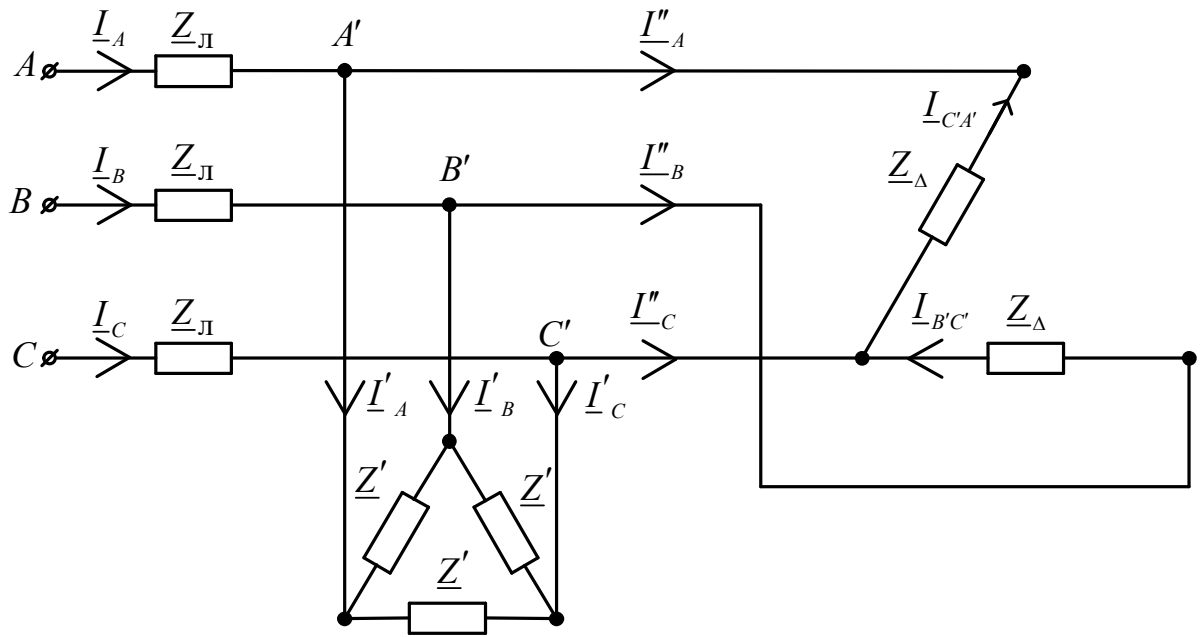


Рисунок 2.3.4 – Схема з перетворенням симетричної зірки на еквівалентний симетричний трикутник

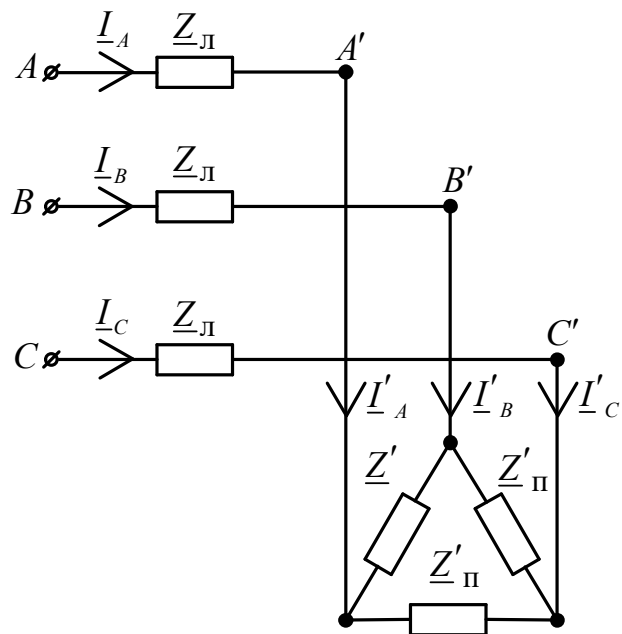


Рисунок 2.3.5 – Схема несиметричного кола при з'єднанні навантаження за схемою «трикутник»

На рис. 2.3.6 представлено перетворення несиметричного трикутника на еквівалентну несиметричну зірку.

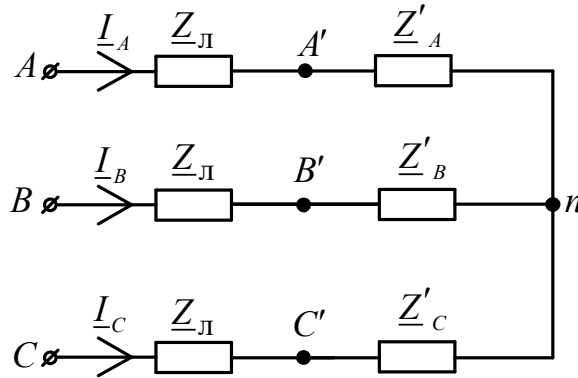


Рисунок 2.3.6 – Несиметричне коло при з'єднанні навантаження за схемою «зірка»

Зведемо трифазне коло до несиметричної еквівалентної зірки (рис. 2.3.7).

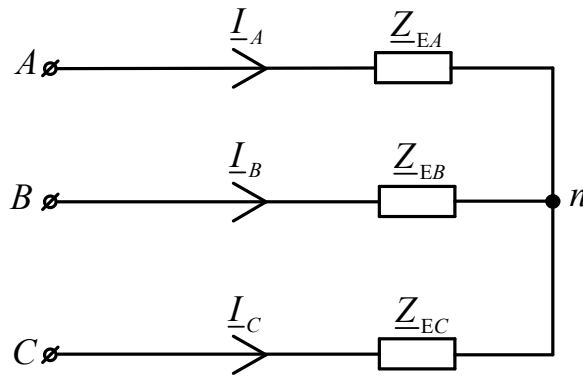


Рисунок 2.3.7 – Схема несиметричного трифазного кола при з'єднанні навантаження за еквівалентної зіркою

Визначимо напругу на фазах навантаження:

$$\begin{aligned}
\underline{U}'_A &= \frac{\underline{U}_{AB}\underline{Y}_{EB} - \underline{U}_{CA}\underline{Y}_{EC}}{\underline{Y}_{EA} + \underline{Y}_{EB} + \underline{Y}_{EC}}; \\
\underline{U}'_B &= \frac{\underline{U}_{BC}\underline{Y}_{EC} - \underline{U}_{AB}\underline{Y}_{EA}}{\underline{Y}_{EA} + \underline{Y}_{EB} + \underline{Y}_{EC}}; \\
\underline{U}'_C &= \frac{\underline{U}_{CA}\underline{Y}_{EA} - \underline{U}_{BC}\underline{Y}_{EB}}{\underline{Y}_{EA} + \underline{Y}_{EB} + \underline{Y}_{EC}}.
\end{aligned}
\tag{2.3.2}$$

Розрахуємо лінійні струми:

$$\underline{I}_A = \frac{\underline{U}'_A}{\underline{Z}_{EA}}; \underline{I}_B = \frac{\underline{U}'_B}{\underline{Z}_{EB}}; \underline{I}_C = \frac{\underline{U}'_C}{\underline{Z}_{EC}}.
\tag{2.3.3}$$

Із схеми, яка наведена на рис. 3.2.3.6, визначаємо напруги:

$$\underline{U}_{C'A'} = \underline{I}_C \underline{Z}'_C - \underline{I}_A \underline{Z}'_A; \underline{U}_{B'C'} = \underline{I}_B \underline{Z}'_B - \underline{I}_C \underline{Z}'_C.
\tag{2.3.4}$$

Із схеми, що представлена на рис. 2.3.3, розраховуємо струми:

$$\begin{aligned}
\underline{I}_{C'A'} &= -\underline{I}'_A = \frac{\underline{U}_{C'A'}}{\underline{Z}_\Delta}; \underline{I}_{B'C'} = \underline{I}''_B = \frac{\underline{U}_{B'C'}}{\underline{Z}_\Delta}; \underline{I}''_C = \underline{I}_{C'A'} - \underline{I}_{B'C'}; \\
\underline{I}'_A &= \underline{I}_A + \underline{I}_{C'A'} = \underline{I}_A + (-\underline{I}''_A) = \underline{I}_A - \underline{I}''_A; \\
\underline{I}'_B &= \underline{I}_B - \underline{I}''_B; \\
\underline{I}'_C &= \underline{I}_C - \underline{I}''_C.
\end{aligned}
\tag{2.3.5}$$

Знайдемо комплексну потужність джерела

$$\underline{S}_{\text{дж}} = \underline{U}_A \underline{I}_A^* + \underline{U}_B \underline{I}_B^* + \underline{U}_C \underline{I}_C^* = P_{\text{дж}} + jQ_{\text{дж}}.
\tag{2.3.6}$$

Визначимо сумарні активну та реактивну потужності споживачів:

$$P_{\text{СП}} = \sum_{k=1}^n I_k^2 R_k, \text{ (Вт)}; \quad Q_{\text{СП}} = \sum_{k=1}^n I_k^2 X_k, \text{ (Вар)}.
\tag{2.3.7}$$

Задача 4

Система лінійних напруг симетрична $U_{\text{л}}=220$ (В). Опори фаз навантаження (рис 2.4.1) є наступними: $\underline{Z}_A = \underline{Z}_B = 20(\text{Ом})$, $\underline{Z}_C = 24 - j7(\text{Ом})$, $\underline{Z}_{ab} = 20 + j15(\text{Ом})$, $\underline{Z}_{bc} = \underline{Z}_{ab}$ та $\underline{Z}_{ca} = 20(\text{Ом})$.

Визначити усі струми та електроенергію за годину роботи усіх споживачів [1].

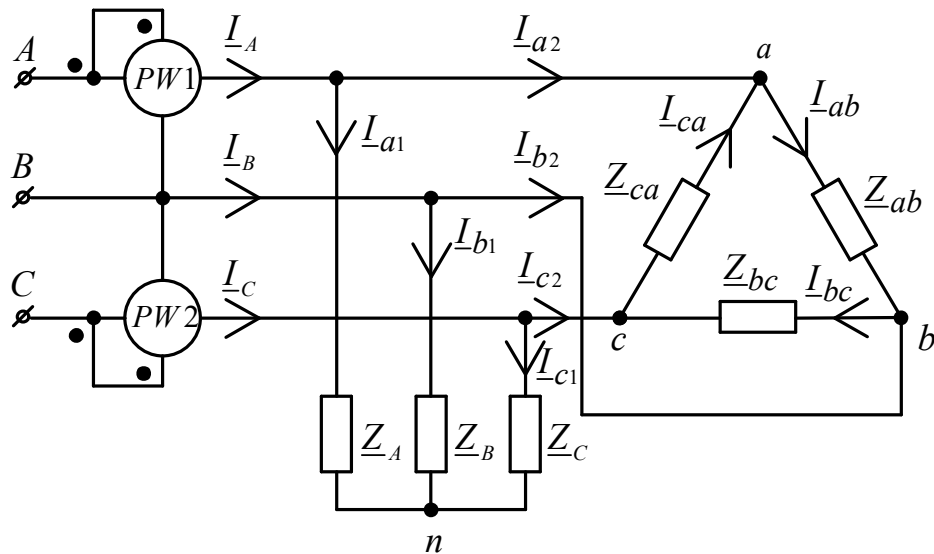


Рисунок 2.4.1 – Схема несиметричного трифазного кола

Рішення

Запишемо фазні ЕРС генератора у комплексному вигляді:

$$\begin{aligned} \underline{E}_A &= E e^{j0} = 127.017 \text{ (В)}; \\ \underline{E}_B &= \underline{E}_A e^{-j120^\circ} = 127.017 e^{-j120^\circ} \text{ (В)}; \\ \underline{E}_C &= \underline{E}_A e^{j120^\circ} = 127.017 e^{j120^\circ} \text{ (В)}. \end{aligned} \tag{2.4.1}$$

Знайдемо значення провідностей окремих фаз:

$$\begin{aligned}\underline{Y}_A &= \frac{1}{\underline{Z}_A} = 0.05 \text{ (См)}; \\ \underline{Y}_B &= \frac{1}{\underline{Z}_B} = 0.05 \text{ (См)}; \\ \underline{Y}_C &= \frac{1}{\underline{Z}_C} = 0.04 \angle -16.26^\circ \text{ (См)}.\end{aligned}\tag{2.4.2}$$

Напряга між нейтральними вузлами споживача та генератора визначається

$$\underline{U}_{nN} = \frac{\underline{Y}_A \underline{E}_A + \underline{Y}_B \underline{E}_B + \underline{Y}_C \underline{E}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C} = 14.75 \angle -108.621^\circ \text{ (В)}.\tag{2.4.3}$$

Фазні струми зірки визначаються за формулами:

$$\begin{aligned}\underline{I}_{a1} &= (\underline{E}_A - \underline{U}_{nN}) \underline{Y}_A = 6.623 \angle 6.057^\circ \text{ (А)}; \\ \underline{I}_{b1} &= (\underline{E}_B - \underline{U}_{nN}) \underline{Y}_B = 5.63 \angle -121.481^\circ \text{ (А)}; \\ \underline{I}_{c1} &= (\underline{E}_C - \underline{U}_{nN}) \underline{Y}_C = 5.489 \angle 131.634^\circ \text{ (А)}.\end{aligned}\tag{2.4.4}$$

Лінійна напруга генератора дорівнює:

$$\begin{aligned}\underline{U}_{AB} &= U_{\text{л}} \angle 30^\circ = 220 \angle 30^\circ \text{ (В)}; \\ \underline{U}_{BC} &= \underline{U}_{AB} e^{-j120^\circ} = 220 \angle -90^\circ \text{ (В)}; \\ \underline{U}_{CA} &= \underline{U}_{AB} e^{j120^\circ} = 220 \angle 150^\circ \text{ (В)}.\end{aligned}\tag{2.4.5}$$

Фазні струми трикутника навантаження визначаються за формулами:

$$\begin{aligned}\underline{I}_{ab} &= \frac{\underline{U}_{AB}}{\underline{Z}_{ab}} = 8.8 \angle -6.87^\circ \text{ (А)}; \\ \underline{I}_{bc} &= \frac{\underline{U}_{BC}}{\underline{Z}_{bc}} = 8.8 \angle -126.87^\circ \text{ (А)}; \\ \underline{I}_{ca} &= \frac{\underline{U}_{CA}}{\underline{Z}_{ca}} = 11 \angle 150^\circ \text{ (А)}.\end{aligned}\tag{2.4.6}$$

Визначимо значення струмів у лінії

$$\begin{aligned}
\underline{I}_{a2} &= \underline{I}_{ab} - \underline{I}_{ca} = 19.403 \angle -19.737^\circ (\text{A}); \\
\underline{I}_{b2} &= \underline{I}_{bc} - \underline{I}_{ab} = 15.242 \angle -156.87^\circ (\text{A}); \\
\underline{I}_{c2} &= \underline{I}_{ca} - \underline{I}_{bc} = 13.239 \angle 108.707^\circ (\text{A}).
\end{aligned}
\tag{2.4.7}$$

Розрахуємо значення фазних струмів генератора:

$$\begin{aligned}
\underline{I}_A &= \underline{I}_{a1} + \underline{I}_{a2} = 25.53 \angle -13.255^\circ (\text{A}); \\
\underline{I}_B &= \underline{I}_{b1} + \underline{I}_{b2} = 20.098 \angle -147.534^\circ (\text{A}); \\
\underline{I}_C &= \underline{I}_{c1} + \underline{I}_{c2} = 18.419 \angle 115.373^\circ (\text{A}).
\end{aligned}
\tag{2.4.8}$$

Складемо баланс потужностей:

$$\begin{aligned}
\underline{S}_{\text{дж}} &= \underline{E}_A \underline{I}_A^* + \underline{E}_B \underline{I}_B^* + \underline{E}_C \underline{I}_C^* = 7752 + j2112 (\text{ВА}); \\
\underline{S}_{\text{сп}} &= I_{a1}^2 \underline{Z}_A + I_{b1}^2 \underline{Z}_B + I_{c1}^2 \underline{Z}_C + \dots \\
&\dots + I_{a2}^2 \underline{Z}_{ab} + I_{b2}^2 \underline{Z}_{bc} + I_{c2}^2 \underline{Z}_{ca} = 7752 + j2112 (\text{ВА}).
\end{aligned}
\tag{2.4.9}$$

Визначимо покази ватметрів та значення електроенергії за годину:

$$\begin{aligned}
P &= \text{Re}(\underline{U}_{AB} \underline{I}_A^*) + \text{Re}(-\underline{U}_{BC} \underline{I}_C^*) = 7752 (\text{Вт}); \\
W &= P \cdot h = 7752 \cdot 1 = 7752 (\text{Вт} \cdot \text{год}).
\end{aligned}
\tag{2.4.10}$$

Представимо на рис. 3.2.4.2 суміщену векторну діаграму струмів та топографічну діаграму напруг складного електричного кола.

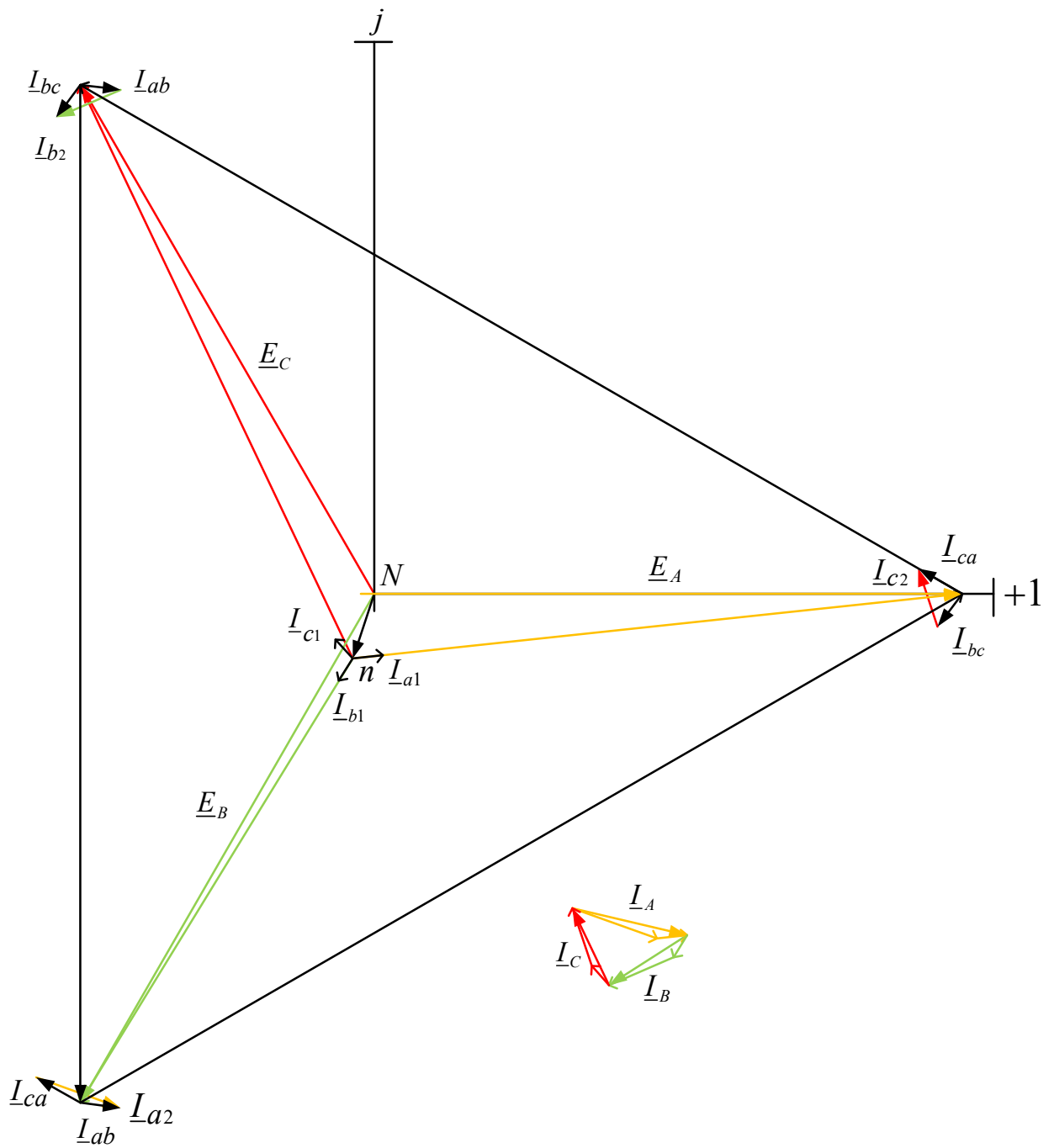


Рисунок 2.4.2 – Суміщена векторна діаграма струмів та топографічна діаграма напруг складного електричного кола

Задача 5

Фазна напруга симетричного трифазного кола $\underline{U}_A = 140e^{j60^\circ}$ (В). Опори фаз навантаження (рис 2.5.1) є наступними: $\underline{Z}_A = 8 - j4$ (Ом), $\underline{Z}_B = j6$ (Ом), $\underline{Z}_C = 10$ (Ом), $\underline{Z}_{ab} = 20 + j15$ (Ом), $\underline{Z}_{bc} = \underline{Z}_{ab} = \underline{Z}_{ca} = 6 + j8$ (Ом) та $\underline{Z}_\Pi = 0.2 + j0.5$ (Ом).

Визначити значення усіх струмів електричного кола.

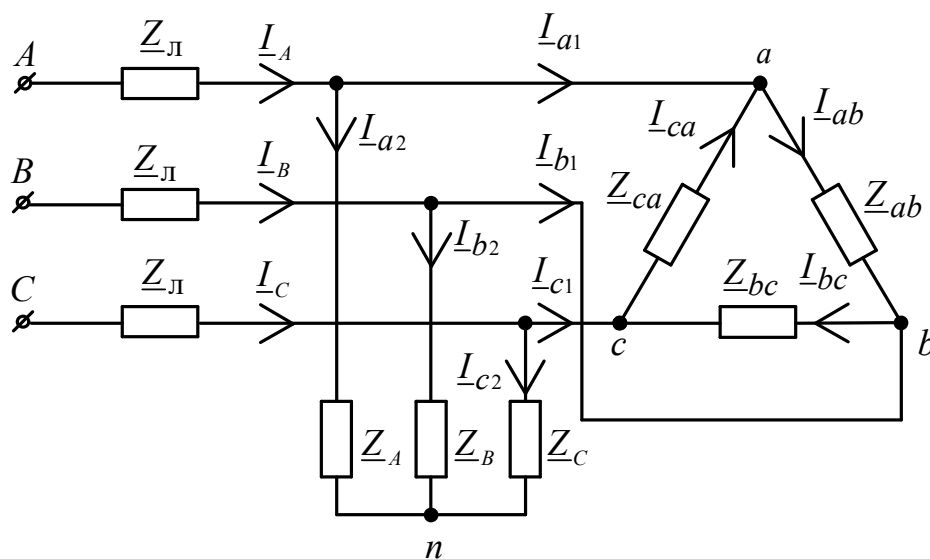


Рисунок 2.5.1 – Схема несиметричного трифазного кола

Рішення

Запишемо фазні ЕРС генератора у комплексному вигляді:

$$\begin{aligned} \underline{E}_A &= E e^{j60^\circ} = 140 e^{j60^\circ} \text{ (В)}; \\ \underline{E}_B &= \underline{E}_A e^{-j120^\circ} = 140 e^{-j60^\circ} \text{ (В)}; \\ \underline{E}_C &= \underline{E}_A e^{j120^\circ} = 140 e^{j180^\circ} \text{ (В)}. \end{aligned} \tag{2.5.1}$$

Перетворимо з'єднання навантаження за схемою «зірка» на з'єднання споживача за схемою «трикутник» рис. 2.5.2

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{ab1} &= \underline{Z}_A + \underline{Z}_B + \frac{\underline{Z}_A + \underline{Z}_B}{\underline{Z}_C} = 12.426 \angle 33.179^\circ \text{ (Ом)}; \\ \underline{Z}_{bc1} &= \underline{Z}_C + \underline{Z}_B + \frac{\underline{Z}_C + \underline{Z}_B}{\underline{Z}_A} = 13.892 \angle 59.744^\circ \text{ (Ом)}; \\ \underline{Z}_{ca1} &= \underline{Z}_C + \underline{Z}_A + \frac{\underline{Z}_C + \underline{Z}_A}{\underline{Z}_B} = 20.71 \angle -56.821^\circ \text{ (Ом)}. \end{aligned} \quad (2.5.2)$$

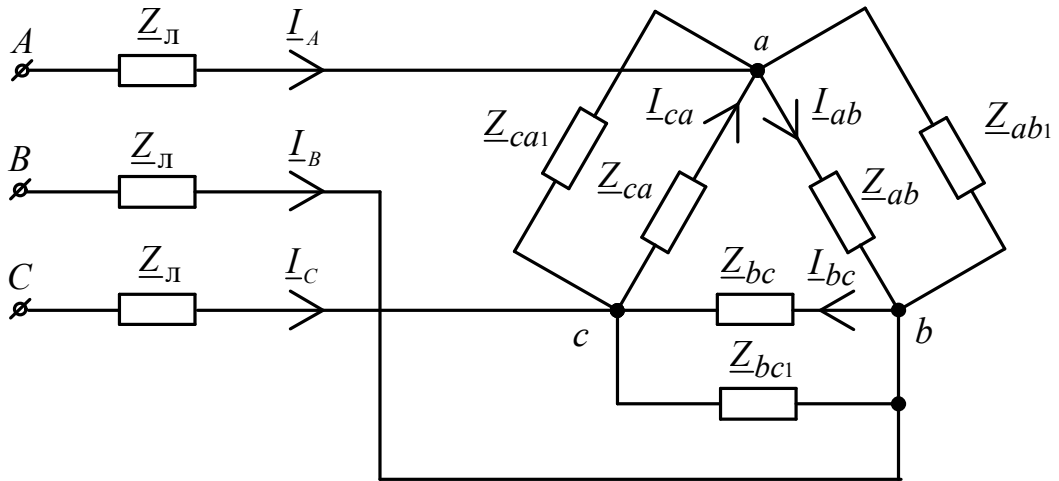


Рисунок 2.5.2 – Схема несиметричного трифазного кола при з'єднанні навантаження трикутником

Два трикутника опорів підключені до мережі паралельно. Знайдемо еквівалентні опори фаз навантаження трикутника (рис. 2.5.3):

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{ab2} &= \frac{\underline{Z}_{ab} \underline{Z}_{ab1}}{\underline{Z}_{ab} + \underline{Z}_{ab1}} = 5.625 \angle 44.244^\circ \text{ (Ом)}; \\ \underline{Z}_{bc2} &= \frac{\underline{Z}_{bc} \underline{Z}_{bc1}}{\underline{Z}_{bc} + \underline{Z}_{bc1}} = 5.824 \angle 55.898^\circ \text{ (Ом)}; \\ \underline{Z}_{ca2} &= \frac{\underline{Z}_{ca} \underline{Z}_{ca1}}{\underline{Z}_{ca} + \underline{Z}_{ca1}} = 10.52 \angle 24.609^\circ \text{ (Ом)}. \end{aligned} \quad (2.5.3)$$

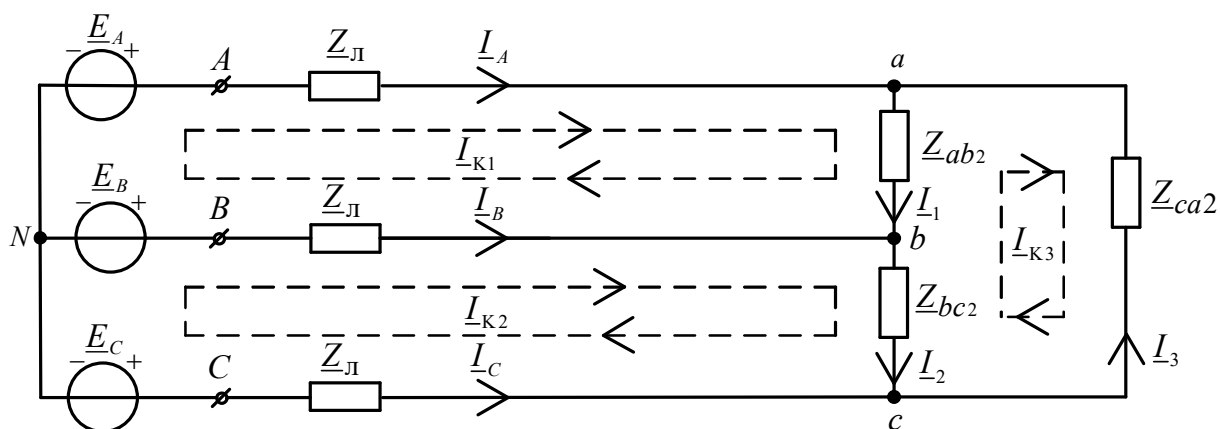


Рисунок 2.5.3 – Схема несиметричного трифазного кола при з'єднанні навантаження трикутником

Використовуючи метод контурних струмів визначимо значення комплексів лінійних струмів:

$$\begin{cases} \underline{I}_{K1}(2\underline{Z}_{Л} + \underline{Z}_{ab2}) - \underline{I}_{K2}\underline{Z}_{Л} - \underline{I}_{K3}\underline{Z}_{ab2} = \underline{U}_A - \underline{U}_B; \\ -\underline{I}_{K1}\underline{Z}_{Л} + \underline{I}_{K2}(2\underline{Z}_{Л} + \underline{Z}_{bc2}) - \underline{I}_{K3}\underline{Z}_{bc2} = \underline{U}_B - \underline{U}_C; \\ -\underline{I}_{K1}\underline{Z}_{ab2} - \underline{I}_{K2}\underline{Z}_{bc2} + \underline{I}_{K3}(\underline{Z}_{ab2} + \underline{Z}_{bc2} + \underline{Z}_{ca2}) = 0; \end{cases}$$

$$\underline{I}_{K1} = 51.499 \angle 24.778^\circ;$$

$$\underline{I}_{K2} = 39.677 \angle -57.069^\circ;$$

$$\underline{I}_{K3} = 20.003 \angle 0.54^\circ;$$

$$\underline{I}_A = \underline{I}_{K1} = 51.499 \angle 24.778^\circ (\text{A});$$

$$\underline{I}_B = \underline{I}_{K2} - \underline{I}_{K1} = 60.39 \angle -114.651^\circ (\text{A});$$

$$\underline{I}_C = -\underline{I}_{K2} = 36.677 \angle 122.931^\circ (\text{A});$$

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_{K1} - \underline{I}_{K3} = 26.756 + j21.395 (\text{A});$$

$$\underline{I}_2 = \underline{I}_{K2} - \underline{I}_{K3} = 21.568 - j33.491 (\text{A});$$

$$\underline{I}_3 = -\underline{I}_{K3} = -20.002 - j0.188 (\text{A}).$$

(2.5.4)

Розрахуємо комплекси фазних струмів трикутника навантаження:

$$\begin{aligned} \underline{I}_{ab} &= \underline{I}_1 \frac{\underline{Z}_{ab1}}{\underline{Z}_{ab} + \underline{Z}_{ab1}} = 19.27 \angle 29.762^\circ (\text{A}); \\ \underline{I}_{bc} &= \underline{I}_2 \frac{\underline{Z}_{bc1}}{\underline{Z}_{bc} + \underline{Z}_{bc1}} = 19.527 \angle -84.552^\circ (\text{A}); \\ \underline{I}_{ca} &= \underline{I}_3 \frac{\underline{Z}_{ca1}}{\underline{Z}_{ca} + \underline{Z}_{ca1}} = 21.042 \angle 152.019^\circ (\text{A}). \end{aligned} \quad (2.5.5)$$

Розрахуємо лінійні струми, що підходять до трикутника навантаження:

$$\begin{aligned} \underline{I}_{a1} &= \underline{I}_{ab} - \underline{I}_{ca} = 35.31 - j0.307 (\text{A}); \\ \underline{I}_{b1} &= \underline{I}_{bc} - \underline{I}_{ab} = -14.874 - j29.004^\circ (\text{A}); \\ \underline{I}_{c1} &= \underline{I}_{ca} - \underline{I}_{bc} = -20.436 + j29.311 (\text{A}). \end{aligned} \quad (2.5.6)$$

Розрахуємо фазні струми навантаження, що з'єднане за схемою «зірка»:

$$\begin{aligned} \underline{I}_{a2} &= \underline{I}_A - \underline{I}_{a1} = 11.447 + j21.891 (\text{A}); \\ \underline{I}_{b2} &= \underline{I}_B - \underline{I}_{b1} = -10.314 - j25.882 (\text{A}); \\ \underline{I}_{c2} &= \underline{I}_C - \underline{I}_{c1} = 18.419 \angle 115.373^\circ (\text{A}). \end{aligned} \quad (2.5.7)$$

Складемо баланс потужностей

$$\begin{aligned} \underline{S}_{\text{ДЖ}} &= \underline{E}_A \underline{I}_A^* + \underline{E}_B \underline{I}_B^* + \underline{E}_C \underline{I}_C^* = 13800 + j15720 (\text{ВА}); \\ \underline{S}_{\text{СП}} &= I_{a2}^2 \underline{Z}_A + I_{b2}^2 \underline{Z}_B + I_{c2}^2 \underline{Z}_C + I_{ab}^2 \underline{Z}_{ab} + I_{bc}^2 \underline{Z}_{bc} + I_{ca}^2 \underline{Z}_{ca} + \dots \\ &\dots + I_A^2 \underline{Z}_\Pi + I_B^2 \underline{Z}_\Pi + I_C^2 \underline{Z}_\Pi = 13800 + j15720 (\text{ВА}). \end{aligned} \quad (2.5.8)$$

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Корощенко О.В. «Теоретичні основи електротехніки. Збірник задач: навчальний посібник» / укл. О.В. Корощенко, В.Ф. Денник, О.А. Журавель та ін.; за заг.ред. О.В. Корощенко.- Донецьк, ДВНЗ «ДонНТУ», 2012.- 673 с.

2. Щерба А.А Симетричні складові та вищі гармоніки у трифазних колах: Метод. вказівки до виконання розрахункових робіт з курсу «Теоретична електротехніка» / А.А Щерба, І.А Курило, І.Н Намацалюк // для студ. напрямів підготовки 0906 «Електротехніка». – К.: НТУУ «КПІ», 2007. – 76 с.

Завдання для самостійного розрахунку несиметричного трифазного кола при з'єднанні споживачів зіркою і трикутником
(варіанти вибрати згідно списку групи)

Задача №2.П.1

До симетричного трифазного генератора підключено несиметричне навантаження, що з'єднане за схемою зірка з нульовим проводом (рис. 2.П.1). Величини фазної ЕРС, опорів фаз навантаження, лінії та нульового проводу наведені у таблиці 2.П.1.

Визначити струми у кожній фазі навантаження та генератора під час наявності нульового проводу та при обриві його. Побудувати векторну діаграму для кожного випадку: (а) – ключ Q замкнутий; (б) – ключ Q розімкнутий.

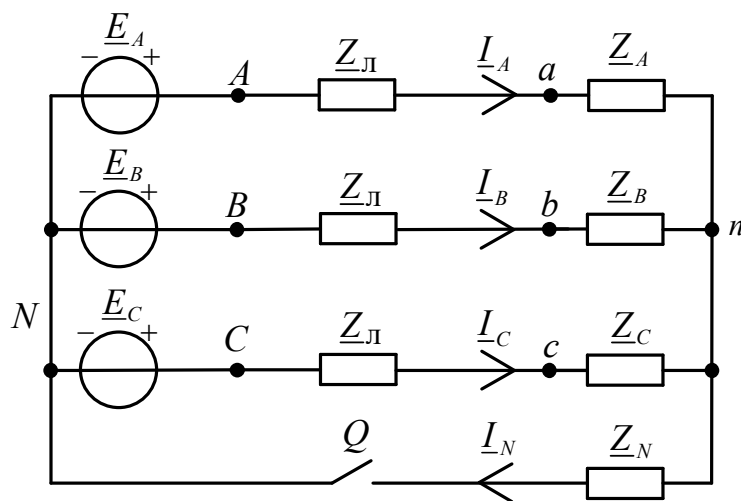


Рисунок 2.П.1 – Схема електричного кола

Параметри електричного кола необхідно вибрати за своїм номером із списку групи та відповідно за варіантом, що наведений в таблиці 2.П.1.

Таблиця 2.П.1 – Значення опорів та фазної ЕРС генератора

№	\underline{E}_A	\underline{Z}_A	\underline{Z}_B	\underline{Z}_C	\underline{Z}_D	\underline{Z}_N
1	$230\angle 0^\circ$	50	$40 + j60$	$80 - j120$	100	0.2
2	$230\angle 30^\circ$	$80 - j120$	50	$40 + j60$	100	0.2
3	$230\angle 60^\circ$	$-j120$	$40 + j60$	50	100	0.2
4	$230\angle 60^\circ$	$40 + j60$	50	$80 - j120$	100	0.2
5	$230\angle 90^\circ$	100	$40 + j60$	$80 - j120$	100	0.2
6	$230\angle 120^\circ$	80	50	$40 + j60$	100	0.2
7	$230\angle 150^\circ$	$80 - j120$	$40 + j60$	50	100	0.2
8	$230\angle 180^\circ$	$j60$	50	$80 - j120$	100	0.2
9	$230\angle 210^\circ$	150	$40 + j60$	$-j120$	100	0.2
10	$230\angle 240^\circ$	$80 - j120$	50	40	100	0.2
11	$230\angle 270^\circ$	$80 - j120$	40	50	100	0.2
12	$230\angle 300^\circ$	40	50	$80 - j120$	100	0.2
13	$230\angle 330^\circ$	200	$j60$	$80 - j120$	100	0.2
14	$230\angle -360^\circ$	$80 - j120$	50	$j60$	100	0.2
15	$230\angle 30^\circ$	$-j120$	$j60$	50	100	0.2
16	$230\angle 60^\circ$	$40 + j60$	50	$-j120$	100	0.2
17	$230\angle 90^\circ$	250	$40 + j60$	80	100	0.2
18	$230\angle 120^\circ$	$80 - j120$	$40 + j60$	$40 + j60$	100	0.2
19	$230\angle 150^\circ$	$40 + j60$	$40 + j60$	50	100	0.2
20	$230\angle 180^\circ$	$40 + j60$	$80 - j120$	$80 - j120$	100	0.2

№	\underline{E}_A	\underline{Z}_A	\underline{Z}_B	\underline{Z}_C	\underline{Z}_Π	\underline{Z}_N
21	$230\angle 210^\circ$	$80 - j120$	$40 + j60$	$80 - j120$	100	0.2
22	$230\angle 240^\circ$	$80 - j120$	50	50	100	0.2
23	$230\angle 270^\circ$	50	$40 + j60$	50	100	0.2
24	$230\angle 300^\circ$	50	50	$80 - j120$	100	0.2
25	$230\angle 330^\circ$	50	$j60$	$j60$	100	0.2
26	$230\angle 360^\circ$	$j60$	50	$j60$	100	0.2
27	$230\angle 30^\circ$	$j60$	$j60$	50	100	0.2
28	$230\angle 60^\circ$	$-j120$	50	$-j120$	100	0.2
29	$230\angle 90^\circ$	50	$-j120$	$-j120$	100	0.2
30	$230\angle 120^\circ$	$-j120$	$-j120$	$40 + j60$	100	0.2

Задача №2.П.2

Система лінійних напруг симетрична U_Π (В). Опори фаз навантаження \underline{Z}_A , \underline{Z}_B , \underline{Z}_C , \underline{Z}_{ab} , \underline{Z}_{bc} , \underline{Z}_{ca} та \underline{Z}_{ca} (Ом) наведені у таблиці 2.П.2.

Визначити струми, напруги, покази вимірювальних приладів та повну комплексну потужність електричного кола (рис 2.П.2).

Побудувати суміщену векторну діаграму струмів та топографічну діаграму напруг складного електричного кола.

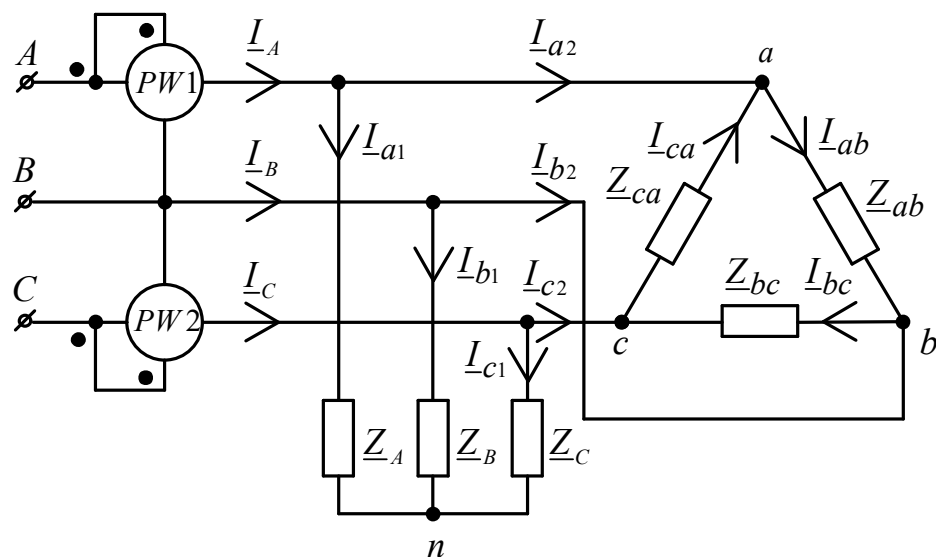


Рисунок 2.П.2 – Схема несиметричного трифазного кола

З таблиці 2.П.2 вибрати параметри електричного кола за номером, який наведений у списку групи.

Таблиця 2.П.2 – Значення опорів та лінійної напруги

№	\underline{U}_{AB}	\underline{Z}_A	\underline{Z}_B	\underline{Z}_C	\underline{Z}_{ab}	\underline{Z}_{bc}	\underline{Z}_{ca}
1	$220\angle 0^\circ$	10	$40 + j20$	20	$60 - j20$	40	40
2	$380\angle 45^\circ$	$40 - j20$	$40 - j20$	20	$60 + j20$	40	$100 - j40$
3	$220\angle 10^\circ$	40	$40 - j20$	20	50	$30 + j20$	$20 - j40$
4	$380\angle 30^\circ$	40	60	$40 + j80$	$80 - j20$	$30 + j20$	40
5	$220\angle 15^\circ$	$40 - j80$	60	$40 + j80$	80	$30 + j20$	40
6	$380\angle 15^\circ$	$40 + j80$	60	60	80	$30 - j20$	40
7	$220\angle 20^\circ$	$50 - j100$	60	$50 - j100$	80	$100 + j20$	40
8	$380\angle 0^\circ$	100	$50 - j100$	$50 - j100$	80	$100 + j20$	$100 + j20$
9	$220\angle 25^\circ$	100	80	$20 + j100$	80	80	$100 + j20$
10	$380\angle -10^\circ$	$100 - j50$	80	$20 + j100$	$20 - j20$	80	$20 + j20$
11	$220\angle 30^\circ$	40	20	$20 + j100$	$20 - j20$	80	80
12	$380\angle -20^\circ$	$40 - j40$	$40 - j40$	30	40	$100 + j100$	40
13	$220\angle 35^\circ$	$30 + j25$	50	50	35	$100 - j100$	35
14	$380\angle -30^\circ$	$30 - j25$	50	$30 - j25$	60	60	$100 + j100$
15	$220\angle 40^\circ$	$50 - j25$	$50 + j100$	50	$100 + j50$	100	$100 - j50$
16	$380\angle -40^\circ$	$30 + j25$	50	$30 + j25$	60	60	$100 - j100$
17	$220\angle 45^\circ$	$50 + j25$	$50 - j100$	50	$100 - j50$	100	$100 + j50$

№	\underline{U}_{AB}	\underline{Z}_A	\underline{Z}_B	\underline{Z}_C	\underline{Z}_{ab}	\underline{Z}_{bc}	\underline{Z}_{ca}
18	$380\angle -50^\circ$	200	200	$50 - j100$	200	$100 - j200$	$100 + j200$
19	$220\angle 50^\circ$	200	$50 - j100$	$50 + j100$	100	$100 + j50$	$100 - j50$
20	$380\angle -60^\circ$	$50 - j100$	200	200	$100 + j50$	100	100
21	$220\angle 55^\circ$	200	100	$50 - j100$	100	$100 + j50$	100
22	$380\angle -70^\circ$	200	$50 + j100$	200	$100 + j50$	$100 - j50$	400
23	$220\angle 60^\circ$	$-j100$	100	$50 + j100$	$40 + j80$	$j50$	100
24	$380\angle -80^\circ$	$200 + j100$	$200 - j100$	$60 - j50$	100	$100 - j100$	$100 + j100$
25	$220\angle 65^\circ$	$20 + j40$	$20 - j40$	$50 + j100$	$40 - j80$	200	$100 - j30$
26	$380\angle -90^\circ$	$200 - j100$	200	400	$j100$	100	100
27	$220\angle 70^\circ$	$20 - j40$	$20 + j40$	$50 - j100$	$40 + j80$	200	$100 + j30$
28	$380\angle -100^\circ$	$-j100$	200	$j400$	$-j100$	100	100
29	$220\angle 75^\circ$	$50 + j100$	100	$20 - j40$	200	$100 + j30$	200
30	$380\angle -110^\circ$	100	$-j200$	100	100	$j100$	100

Практичне заняття №3 Розрахунок лінійного електричного кола з несинусоїдною ЕРС

Розкладання періодичної несинусоїдної ЕРС в тригонометричний ряд Фур'є. Розрахунок миттєвих струмів та визначення діючих значень струмів і напруг. Визначення потужностей кола несинусоїдного струму та складання балансу потужностей.

Особливості протікання струмів прямої, зворотної та нульової послідовностей фаз в симетричному трифазному колі при з'єднанні в зірку чи трикутник. Розрахунок миттєвих значень струмів і напруг. Визначення діючих значень фазних і лінійних струмів і напруг симетричного трифазного кола.

Задача 1

Розкласти в тригонометричний ряд Фур'є періодичну функцію напруги (рис. 3.1.1). Розрахунки зробити для $x = 0 \div 2\pi$ та з урахуванням номерів гармонік $k = 1, 2 \dots 6$.

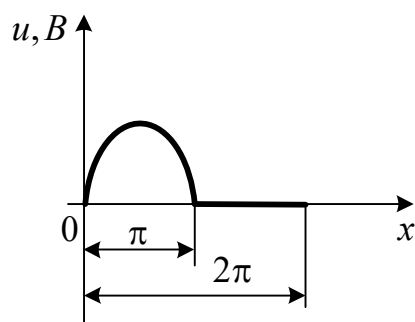


Рисунок 3.1.1 – Графік функції напруги

Рівняння заданої кривої на інтервалі від 0 до π

$$f_1(x) = \sin(x), \quad (3.1.1)$$

а на інтервалі π до 2π

$$f_2(x) = 0. \quad (3.1.2)$$

Розбиваємо область інтегрування на дві ділянки та знаходимо коефіцієнти ряду:

$$A_0 = \left[\int_0^{\pi} f_1(x) dx + \int_{\pi}^{2\pi} f_2(x) dx \right] = 2, \quad a_0 = \frac{A_0}{2\pi} = 0.318;$$

$$B_k = \frac{\left[\int_0^{\pi} f_1(x) \sin(kx) dx + \int_{\pi}^{2\pi} f_2(x) \sin(kx) dx \right]}{\pi};$$

$$C_k = \frac{\left[\int_0^{\pi} f_1(x) \cos(kx) dx + \int_{\pi}^{2\pi} f_2(x) \cos(kx) dx \right]}{\pi};$$

$$u(x) = a_0 + \sum_{k=1}^6 \left[(B_k \sin(kx) + C_k \cos(kx)) \right];$$

$$B = \begin{pmatrix} 0 \\ 0.5 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad C = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -0.212 \\ 0 \\ -0.042 \\ 0 \\ -0.018 \end{pmatrix} \quad (3.1.3)$$

Задача 2

Самостійно розкласти в тригонометричний ряд Фур'є періодичну функцію напруги $y(x) = |\sin(x)|$. Розрахунки зробити для $x = 0 \div 2\pi$ та з урахуванням номерів гармонік $k = 1, 2, \dots, 6$.

Побудувати на одному рисунку графік заданої функції та функції, що записується через коефіцієнти ряду Фур'є.

Задача 3

На рис. 3.3.1 представлено електричне коло, параметри якого на основній частоті ($f = 50$ (Гц)) дорівнюють $\omega_1 L = 12$ (Ом), $1/(\omega_1 C) = 30$ (Ом), $R_1 = 6$ (Ом), $R_2 = 5$ (Ом), $R_3 = 20$ (Ом). Напруга, що прикладаються до

електричного кола, описуються наступним виразом
 $u=30+100\sin(\omega_1t)+40\sin(3\omega_1t+20^\circ)$ (В).

Записати рівняння миттєвих значень струмів та їх діючі значення, обрахувати потужність кола [1].

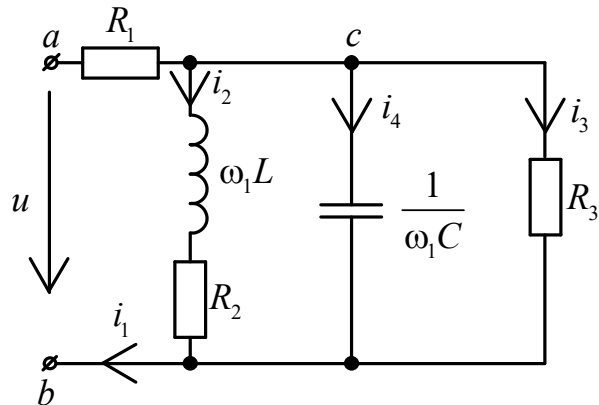


Рисунок 3.3.1 – Схема електричного кола

На рис. 3.3.2 представлені постійна компонента та гармоніки кривої напруги u .

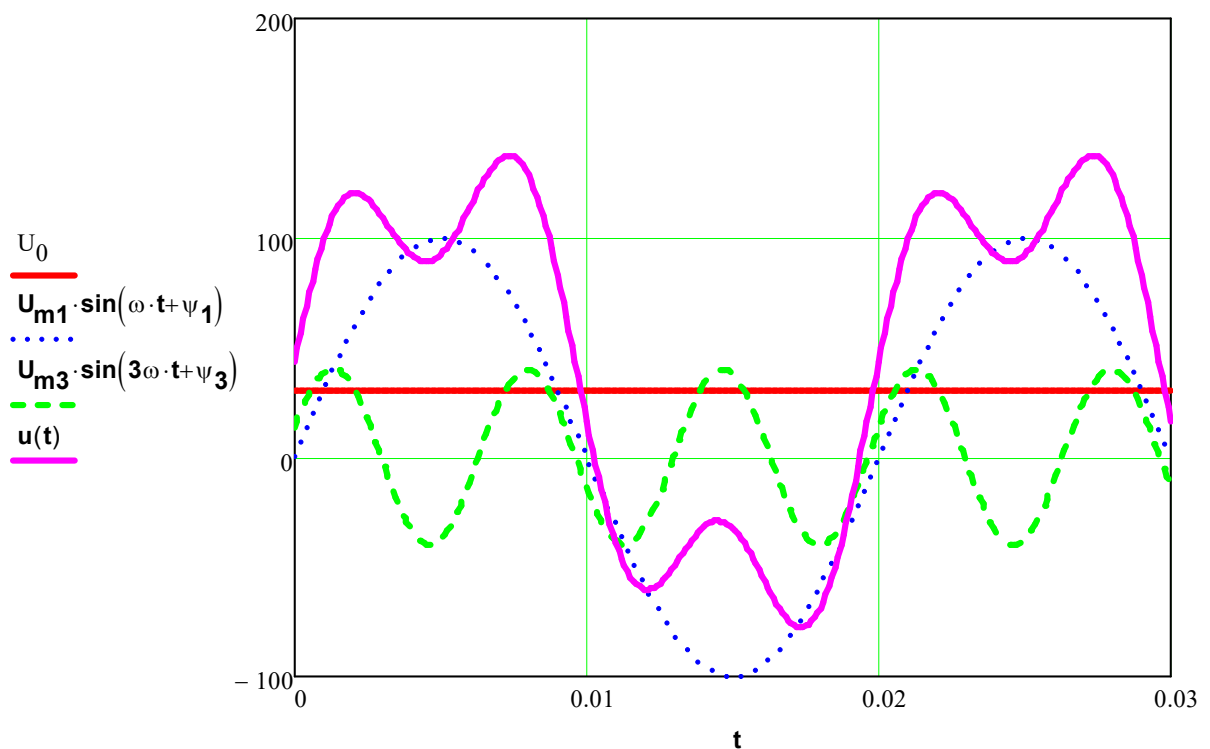


Рисунок 3.3.2 – Графіки несинусоїдної напруги живлення u та її складових

Рішення

Розрахунок сталої складової. Визначимо еквівалентний опір кола та величини постійного струму й напруг:

$$\begin{aligned}R_{e(0)} &= R_1 + \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3} = 6 + \frac{5 \cdot 20}{5 + 20} = 10(\text{Ом}); \\I_{1(0)} &= \frac{U_0}{R_{e(0)}} = \frac{30}{10} = 3(\text{А}); \\I_{2(0)} &= I_{1(0)} \frac{R_3}{R_2 + R_3} = 3 \frac{20}{5 + 20} = 2.4(\text{А}); \\I_{3(0)} &= I_{1(0)} - I_{2(0)} = 3 - 2.4 = 0.6(\text{А}); \\I_{4(0)} &= 0; \\U_{R1(0)} &= I_{1(0)} \cdot R_1 = 3 \cdot 6 = 18(\text{В}); \\U_{R2(0)} &= I_{2(0)} \cdot R_2 = 2.4 \cdot 5 = 12(\text{В}); \\U_{R3(0)} &= I_{3(0)} \cdot R_3 = 0.6 \cdot 20 = 12(\text{В}).\end{aligned}\tag{3.3.1}$$

Розрахунок першої гармоніки. Визначимо комплексний опір усього кола:

$$\begin{aligned}\underline{Z}_{1(1)} &= R_1 = 6(\text{Ом}); \\ \underline{Z}_{2(1)} &= R_2 + jX_{L(1)} = 5 + j12(\text{Ом}); \\ \underline{Z}_{3(1)} &= R_3 = 20(\text{Ом}); \\ \underline{Z}_{4(1)} &= -jX_{C(1)} = -j30(\text{Ом}); \\ \underline{Z}_{cb(1)} &= \frac{1}{\frac{1}{\underline{Z}_{2(1)}} + \frac{1}{\underline{Z}_{3(1)}} + \frac{1}{\underline{Z}_{4(1)}}} = \\ &= \frac{1}{\frac{1}{(5 + j12)} + \frac{1}{20} + \frac{1}{-j30}} = 10.265 + j4.859(\text{Ом}); \\ \underline{Z}_{e(1)} &= \underline{Z}_{1(1)} + \underline{Z}_{cb(1)} = 6 + (10.265 + j4.859) = 16.265 + j4.859(\text{Ом}).\end{aligned}\tag{3.3.2}$$

Знайдемо максимальні комплексні струми та напруги на ділянках електричного кола:

$$\begin{aligned}
\underline{I}_{1m(1)} &= \frac{\underline{U}_{m(1)}}{\underline{Z}_{e(1)}} = \frac{100}{16.265 + j4.859} = 5.891 \angle -16.633^\circ (\text{A}); \\
\underline{I}_{2m(1)} &= \frac{\underline{I}_{1m(1)} \cdot \underline{Z}_{cb(1)}}{\underline{Z}_{2(1)}} = \frac{5.891 \angle -16.633^\circ \cdot (10.265 + j4.859)}{5 + j12} = \\
&= 5.146 \angle -58.682^\circ (\text{A}); \\
\underline{I}_{3m(1)} &= \frac{\underline{I}_{1m(1)} \cdot \underline{Z}_{cb(1)}}{\underline{Z}_{3(1)}} = \frac{5.891 \angle -16.633^\circ \cdot (10.265 + j4.859)}{20} = \\
&= 3.345 \angle 8.698^\circ (\text{A}); \\
\underline{I}_{4m(1)} &= \frac{\underline{I}_{1m(1)} \cdot \underline{Z}_{cb(1)}}{\underline{Z}_{4(1)}} = \frac{5.891 \angle -16.633^\circ \cdot (10.265 + j4.859)}{-j30} = \\
&= 2.23 \angle 98.698^\circ (\text{A}); \\
\underline{U}_{1m(1)} &= \underline{Z}_{1(1)} \cdot \underline{I}_{1m(1)} = 6 \cdot 5.891 \angle -16.633^\circ = 35.346 \angle -16.633^\circ (\text{В}); \\
\underline{U}_{2m(1)} &= \underline{Z}_{2(1)} \cdot \underline{I}_{2m(1)} = (5 + j12) \cdot 5.146 \angle -58.682^\circ = 66.903 \angle 8.698^\circ (\text{В}); \\
\underline{U}_{3m(1)} &= \underline{Z}_{3(1)} \cdot \underline{I}_{3m(1)} = 20 \cdot 3.345 \angle 8.698^\circ = 66.903 \angle 8.698^\circ (\text{В}); \\
\underline{U}_{4m(1)} &= \underline{Z}_{4(1)} \cdot \underline{I}_{4m(1)} = -j30 \cdot 2.23 \angle 98.698^\circ = 66.903 \angle 8.698^\circ (\text{В}).
\end{aligned}
\tag{3.3.3}$$

Розрахунок третьої гармоніки. Визначимо комплексний опір усього кола:

$$\begin{aligned}
\underline{Z}_{1(3)} &= R_1 = 6 (\text{Ом}); \\
\underline{Z}_{2(3)} &= R_2 + 3 \cdot j \cdot X_{L(1)} = 5 + 3 \cdot j \cdot 12 = 5 + j36 (\text{Ом}); \\
\underline{Z}_{3(3)} &= R_3 = 20 (\text{Ом}); \\
\underline{Z}_{4(3)} &= -\frac{jX_{C(1)}}{3} = -\frac{j30}{3} = -j10 (\text{Ом}); \\
\underline{Z}_{cb(3)} &= \frac{1}{\frac{1}{\underline{Z}_{2(3)}} + \frac{1}{\underline{Z}_{3(3)}} + \frac{1}{\underline{Z}_{4(3)}}} = \frac{1}{\frac{1}{(5 + j36)} + \frac{1}{20} + \frac{1}{-j10}} = \\
&= 6.571 - j8.888 (\text{Ом}); \\
\underline{Z}_{e(3)} &= \underline{Z}_{1(3)} + \underline{Z}_{cb(3)} = 6 + (6.571 - j8.888) = 12.571 - j8.888 = \\
&= 15.396 \angle -35.261^\circ (\text{Ом}).
\end{aligned}
\tag{3.3.4}$$

Знайдемо максимальні комплексні струми та напруги на ділянках електричного кола:

$$\begin{aligned}
\underline{I}_{1m(3)} &= \frac{\underline{U}_{m(3)}}{\underline{Z}_e(3)} = \frac{40 \angle 20^\circ}{15.396 \angle -35.261^\circ} = 2.598 \angle 55.261^\circ (\text{A}); \\
\underline{I}_{2m(3)} &= \frac{\underline{I}_{1m(3)} \cdot \underline{Z}_{cb(3)}}{\underline{Z}_{2(3)}} = \frac{2.598 \angle 55.261^\circ \cdot (6.571 - j8.888)}{5 + j36} = 0.79 \angle -80.355^\circ (\text{A}); \\
\underline{I}_{3m(3)} &= \frac{\underline{I}_{1m(3)} \cdot \underline{Z}_{cb(3)}}{\underline{Z}_{3(3)}} = \frac{2.598 \angle 55.261^\circ \cdot (6.571 - j8.888)}{20} = 1.436 \angle 1.737^\circ (\text{A}); \\
\underline{I}_{4m(3)} &= \frac{\underline{I}_{1m(3)} \cdot \underline{Z}_{cb(3)}}{\underline{Z}_{4(3)}} = \frac{2.598 \angle 55.261^\circ \cdot (6.571 - j8.8889)}{-j10} = 2.872 \angle 91.737^\circ (\text{A}); \\
\underline{U}_{1m(3)} &= \underline{Z}_{1(3)} \cdot \underline{I}_{1m(3)} = 6 \cdot 2.598 \angle 55.261^\circ = 15.589 \angle 55.261^\circ (\text{B}); \\
\underline{U}_{2m(3)} &= \underline{Z}_{2(3)} \cdot \underline{I}_{2m(3)} = (5 + j36) \cdot 0.79 \angle -80.355^\circ = 28.718 \angle 1.737^\circ (\text{B}); \\
\underline{U}_{3m(3)} &= \underline{Z}_{3(3)} \cdot \underline{I}_{3m(3)} = 20 \cdot 1.436 \angle 1.737^\circ = 28.718 \angle 1.737^\circ (\text{B}); \\
\underline{U}_{4m(3)} &= \underline{Z}_{4(3)} \cdot \underline{I}_{4m(3)} = -j \cdot 10 \cdot 2.872 \angle 91.73^\circ = 28.718 \angle 1.737^\circ (\text{B}).
\end{aligned}
\tag{3.3.5}$$

Запишемо миттєві значення струмів та представимо їх на рис. 3.3.3:

$$\begin{aligned}
i_1(t) &= 3 + 5.891 \sin(\omega_1 t - 16.633^\circ) + 2.598 \sin(3\omega_1 t + 55.261^\circ) (\text{A}); \\
i_2(t) &= 2.4 + 5.146 \sin(\omega_1 t - 58.682^\circ) + 0.79 \sin(3\omega_1 t - 80.355^\circ) (\text{A}); \\
i_3(t) &= 0.6 + 3.345 \sin(\omega_1 t + 8.698^\circ) + 1.436 \sin(3\omega_1 t + 1.737^\circ) (\text{A}); \\
i_4(t) &= 2.23 \sin(\omega_1 t + 98.698^\circ) + 2.872 \sin(3\omega_1 t + 91.737^\circ) (\text{A}).
\end{aligned}
\tag{3.3.6}$$

Знайдемо діючі значення струмів віток та вхідної напруги електричного кола:

$$\begin{aligned}
I_1 &= \sqrt{I_{1(0)}^2 + \frac{I_{1m(1)}^2 + I_{1m(3)}^2}{2}} = \sqrt{3^2 + \frac{5.891^2 + 2.598^2}{2}} = 5.452 (\text{A}); \\
I_2 &= \sqrt{I_{2(0)}^2 + \frac{I_{2m(1)}^2 + I_{2m(3)}^2}{2}} = \sqrt{2.4^2 + \frac{5.146^2 + 0.79^2}{2}} = 4.395 (\text{A}); \\
I_3 &= \sqrt{I_{3(0)}^2 + \frac{I_{3m(1)}^2 + I_{3m(3)}^2}{2}} = \sqrt{0.6^2 + \frac{3.345^2 + 1.436^2}{2}} = 2.643 (\text{A}); \\
I_4 &= \sqrt{\frac{I_{4m(1)}^2 + I_{4m(3)}^2}{2}} = \sqrt{\frac{2.23^2 + 2.872^2}{2}} = 2.571 (\text{A}); \\
U &= \sqrt{U_0^2 + \frac{U_{m(1)}^2 + U_{m(3)}^2}{2}} = \sqrt{30^2 + \frac{100^2 + 40^2}{2}} = 81.854 (\text{B}).
\end{aligned}
\tag{3.3.7}$$

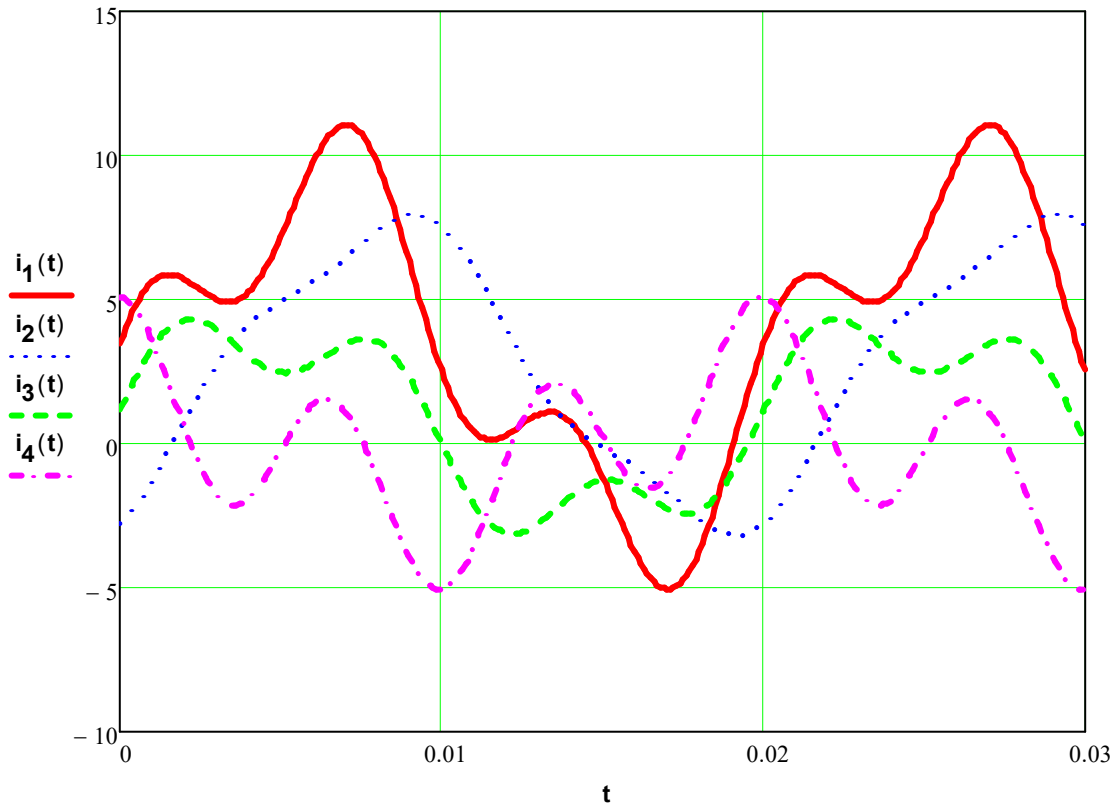


Рисунок 3.3.3 – Графіки миттєвих значень струмів

Розрахуємо потужність, яка споживається електричним колом:

$$\begin{aligned}
 P_{\text{дж}} &= U_{(0)} \cdot I_{1(0)} + \frac{\operatorname{Re}(U_{m(1)} \cdot I_{1m(1)}^*) + \operatorname{Re}(U_{m(3)} \cdot I_{1m(3)}^*)}{2} = \\
 &= 30 \cdot 3 + \frac{\operatorname{Re}(100 \cdot 5.891 \angle 16.633^\circ) + \operatorname{Re}(40 \cdot 2.598 \angle -55.261^\circ)}{2} = 414.651 \text{ (Вт)}; \\
 P_{\text{сп}} &= I_1^2 \cdot R_1 + I_2^2 \cdot R_2 + I_3^2 \cdot R_3 = 5.452^2 \cdot 6 + 4.395^2 \cdot 5 + 2.643^2 \cdot 20 = 414.651 \text{ (Вт)}; \\
 Q_{\text{дж}} &= \frac{\operatorname{Im}(U_{m(1)} \cdot I_{1m(1)}^*) + \operatorname{Im}(U_{m(3)} \cdot I_{1m(3)}^*)}{2} = \\
 &= \frac{\operatorname{Im}(100 \cdot 5.891 \angle 16.633) + \operatorname{Im}(40 \cdot 2.598 \angle -55.261)}{2} = 54.313 \text{ (Вар)}; \\
 Q_{\text{сп}} &= \frac{(I_{2m(1)})^2}{2} \omega_{(1)} L + \frac{(I_{2m(3)})^2}{2} 3\omega_{(1)} L - \frac{(I_{4m(1)})^2}{2} \frac{1}{\omega_{(1)} C} + \dots \\
 &\dots - \frac{(I_{4m(3)})^2}{2} \frac{1}{3\omega_{(1)} C} = \frac{(5.891)^2}{2} 12 + \frac{(2.598)^2}{2} 36 - \frac{(2.23)^2}{2} 30 + \dots \\
 &\dots - \frac{(2.872)^2}{2} 10 = 54.313 \text{ (Вар)}.
 \end{aligned}$$

(3.3.8)

Знайдемо повну потужність кола, коефіцієнт потужності та потужність спотворення:

$$\begin{aligned}
 S &= U \cdot I_1 = 81.854 \cdot 5.452 = 446.283 \text{ (ВА)}; \\
 \lambda &= \frac{P}{S} = \frac{414.651}{446.283} = 0.929; \\
 T &= \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2} = \\
 &= \sqrt{446.283^2 - 414.651^2 - 54.313^2} = 155.83 \text{ (ВА)}.
 \end{aligned}
 \tag{3.3.9}$$

Задача 4

Підібрати параметри C_1 та C_2 так, щоб у колі на першій гармоніці був резонанс напруг, коло не пропускало третю гармоніку. Якщо задано: $R_1 = 50$ (Ом), $L_1 = 0.002$ (Гн) та $\omega_1 = 5000$ (рад/с).

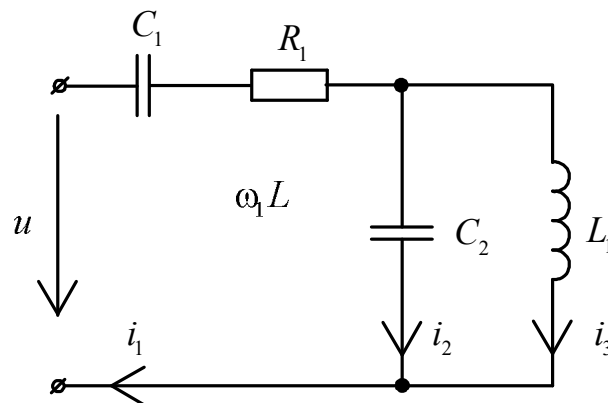


Рисунок 3.4.1 – Схема електричного кола

Рішення

Запишемо вираз для частотної характеристики

$$\begin{aligned}
 X_{\text{вх}}(\omega) &= -\frac{1}{\omega C_1} + \frac{\omega L_1 \cdot \left(-\frac{1}{\omega C_2}\right)}{\omega L_1 + \left(-\frac{1}{\omega C_2}\right)} = -\frac{1}{\omega C_1} - \frac{\omega L_1}{\omega^2 L_1 C_2 - 1} = \\
 &= \frac{-\omega^2 L_1 C_2 + 1 - \omega^2 L_1 C_1}{\omega C_1 (\omega^2 L_1 C_2 - 1)} = \frac{H(\omega)}{F(\omega)}.
 \end{aligned}
 \tag{3.4.1}$$

Для резонансу струмів

$$\begin{aligned}
 F(3 \cdot \omega_1) &= 0; \\
 (3 \cdot \omega)^2 L_1 C_2 - 1 &= 0 \rightarrow (3 \cdot \omega)^2 L_1 C_2 = 1; \\
 C_2 &= \frac{1}{(3 \cdot \omega)^2 L_1} = 2.222 \cdot 10^{-6} \text{ (Ф)}.
 \end{aligned}
 \tag{3.4.2}$$

Для резонансу напруг

$$\begin{aligned}
 H(\omega_1) &= 0; \\
 -\omega_1^2 L_1 C_2 + 1 - \omega_1^2 L_1 C_1 &= 0; \\
 C_1 &= \frac{-\omega_1^2 L_1 C_2 + 1}{\omega_1^2 L_1} = 1.778 \cdot 10^{-6} \text{ (Ф)}.
 \end{aligned}
 \tag{3.4.3}$$

Задача 5

Визначити покази приладів [2] трифазного кола (рис. 3.5.1). ЕРС фази A генератора $e_A(t) = 120\sqrt{2} \sin(\omega_{(1)}t) + 60\sqrt{2} \sin(3\omega_{(1)}t) + 80\sqrt{2} \sin(5\omega_{(1)}t + 45^\circ)$ (В).
 Параметри навантаження: $R_1 = 7.07$ (Ом) та $X_{L1} = 7.07$ (Ом).

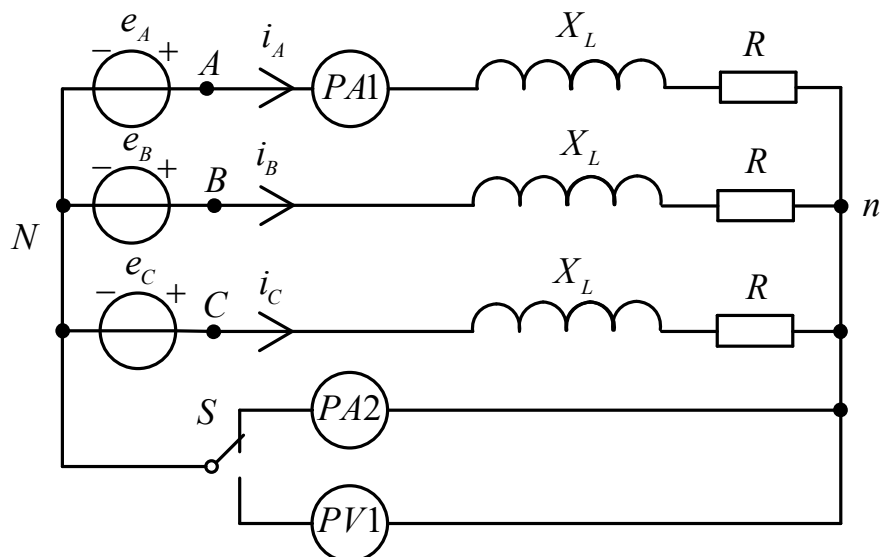


Рисунок 3.5.1 – Схема трифазного електричного кола

Рішення

Визначити покази приладів, якщо $PV1$ включений між нейтральними точками генератора та навантаження.

Розрахуємо фазні струми для першої та п'ятої гармонік (так як немає нульового проводу то струми не містять гармоніки, кратні трьом)

$$\begin{aligned} \underline{I}_{A(1)} &= \frac{\underline{E}_{A(1)}}{R_1 + jX_{L1}} = \frac{120}{7.07 + j707} = 12.002 \angle -45^\circ (\text{A}); \\ \underline{I}_{A(3)} &= 0; \\ \underline{I}_{A(5)} &= \frac{\underline{E}_{A(5)}}{R_1 + 5 \cdot jX_{L1}} = \frac{80 \angle 45^\circ}{7.07 + 5 \cdot j707} = 2.219 \angle -33.69^\circ (\text{A}). \end{aligned} \quad (3.5.1)$$

Знайдемо показ амперметра $PA1$ (діюче значення)

$$I_A = \sqrt{I_{A(1)}^2 + 0^2 + I_{A(5)}^2} = \sqrt{12.002^2 + 0^2 + 2.219^2} = 12.205 (\text{A}). \quad (3.5.2)$$

Вольтметра $PV1$ покаже напругу третьої гармоніки $U_{PV1} = U_{nN} = 60, (\text{B})$.

Визначити покази приладів, якщо $PA2$ включений між нейтральними точками генератора та навантаження.

Розрахуємо фазні струми для усіх гармонік

$$\begin{aligned} \underline{I}_{A(1)} &= \frac{\underline{E}_{A(1)}}{R_1 + jX_{L1}} = \frac{120}{7.07 + j707} = 12.002 \angle -45^\circ (\text{A}); \\ \underline{I}_{A(3)} &= \frac{\underline{E}_{A(3)}}{R_1 + 3 \cdot jX_{L1}} = \frac{60 \angle 0^\circ}{7.07 + 3 \cdot j707} = 2.219 \angle -71.565^\circ (\text{A}); \\ \underline{I}_{A(5)} &= \frac{\underline{E}_{A(5)}}{R_1 + 5 \cdot jX_{L1}} = \frac{80 \angle 45^\circ}{7.07 + 5 \cdot j707} = 2.219 \angle -33.69^\circ (\text{A}). \end{aligned} \quad (3.5.3)$$

Знайдемо покази амперметрів $PA1$ та $PA2$

$$\begin{aligned}
 I_A = I_{PA1} &= \sqrt{I_{A(1)}^2 + I_{A(3)}^2 + I_{A(5)}^2} = \\
 &= \sqrt{12.002^2 + 2.684^2 + 2.219^2} = 12.497(\text{A}), \\
 I_N = I_{PA2} &= 3 \cdot I_{A(3)} = 3 \cdot 2.684 = 8.051(\text{A}).
 \end{aligned}
 \tag{3.5.4}$$

Амперметр $PA2$ покаже збільшене у три рази значення струму третьої гармоніки $I_{PA2} = 8.051(\text{A})$.

Задача 6

Визначити покази приладів [2] трифазного кола (рис. 3.6.1). ЕРС фази A генератор $e_A(t) = 120\sqrt{2} \sin(\omega_{(1)}t) + 60\sqrt{2} \sin(3\omega_{(1)}t + 45^\circ) + 30\sqrt{2} \sin(5\omega_{(1)}t - 90^\circ)$ (В). Параметри навантаження: $R_1 = 20$ (Ом), $X_{C1} = 30$ (Ом) та $X_{L1} = 2$ (Ом).

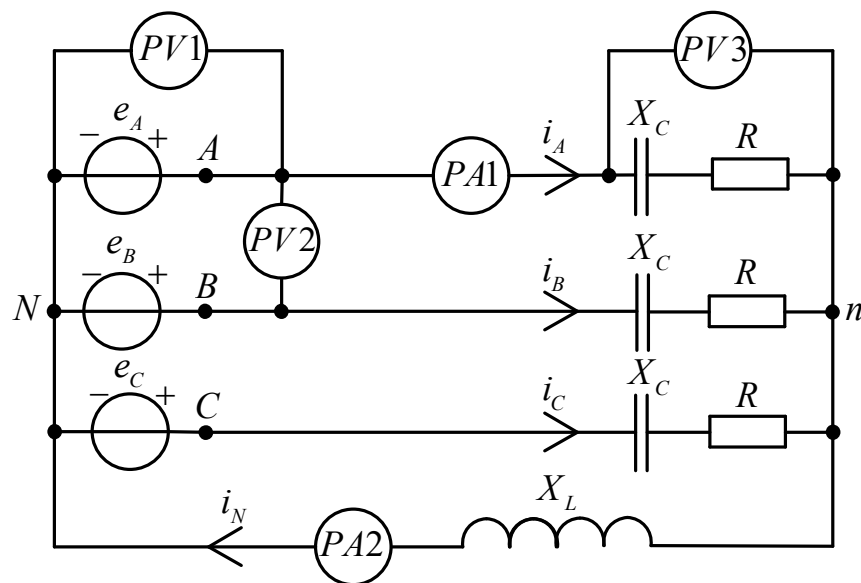


Рисунок 3.6.1 – Схема трифазного кола

Рішення

Розрахуємо напругу зміщення нейтралі для третьої гармоніки (для першої та п'ятої напруга зміщення нейтралі дорівнює нулю, так як пряма та зворотна послідовність чергування фаз ЕРС є симетричними системами)

$$\begin{aligned} \underline{U}_{nN(3)} &= \frac{3 \cdot \underline{E}_{A(3)} \frac{1}{R_{(1)} - j \frac{X_{C(1)}}{3}}}{3 \cdot \left[\frac{1}{R_{(1)} - j \frac{X_{C(1)}}{3}} \right] + \frac{1}{3 \cdot jX_{L(1)}}} = \\ &= \frac{3 \cdot 120 \angle 45^\circ \cdot \frac{1}{20 - j \frac{30}{3}}}{3 \cdot \left[\frac{1}{20 - j \frac{30}{3}} \right] + \frac{1}{3 \cdot j2}} = 50.138 \angle 113.199^\circ, (\text{В}). \end{aligned} \quad (3.6.1)$$

Розрахуємо фазні струми для першої, третьої та п'ятої гармонік

$$\begin{aligned} \underline{I}_{A(1)} &= \frac{\underline{E}_{A(1)}}{R_{(1)} - jX_{C(1)}} = \frac{120}{20 - j30} = 3.328 \angle 56.31^\circ (\text{А}); \\ \underline{I}_{A(3)} &= \frac{\underline{E}_{A(3)} - \underline{U}_{nN(3)}}{R_{(1)} - j \frac{X_{C(1)}}{3}} = \\ &= \frac{60 \angle 45^\circ - 50.138 \angle 113.199^\circ}{20 - j \frac{30}{3}} = 2.785 \angle 23.199^\circ (\text{А}); \\ \underline{I}_{A(5)} &= \frac{\underline{E}_{A(5)}}{R_{(1)} - j \frac{X_{C(1)}}{5}} = \frac{30 \angle -90^\circ}{20 - j \frac{30}{5}} = 1.437 \angle -73.301^\circ (\text{А}); \\ \underline{I}_{N(3)} &= \frac{\underline{U}_{nN(3)}}{3 \cdot jX_{L(1)}} = \frac{50.138 \angle 113.199^\circ}{3 \cdot j3} = 8.356 \angle -23.199^\circ (\text{А}). \end{aligned} \quad (3.6.2)$$

Запишемо діючі значення гармонік фазних напруг навантаження

$$\begin{aligned}
U_{A(1)} &= E_{A(1)} = 120(\text{В}); \\
U_{A(3)} &= \left| I_{A(3)} \left(R_{(3)} - j \frac{X_{C(3)}}{3} \right) \right| = \\
&= \left| 2.785 \angle 23.199^\circ \cdot \left(20 - j \frac{30}{3} \right) \right| = 62.284(\text{В}); \\
U_{A(5)} &= E_{A(5)} = 30(\text{В}).
\end{aligned} \tag{3.6.3}$$

Визначимо покази приладів

$$\begin{aligned}
U_{PV1} &= \sqrt{E_{A(1)}^2 + E_{A(3)}^2 + E_{A(5)}^2} = \\
&= \sqrt{120^2 + 60^2 + 30^2} = 137.477(\text{В}); \\
U_{PV2} &= \sqrt{3} \sqrt{U_{A(1)}^2 + U_{A(5)}^2} = \\
&= \sqrt{3} \sqrt{120^2 + 30^2} = 214.243(\text{В}); \\
U_{PV3} &= \sqrt{U_{A(1)}^2 + U_{A(3)}^2 + U_{A(5)}^2} = \\
&= \sqrt{120^2 + 62.284^2 + 30^2} = 138.489(\text{В}); \\
I_{PA1} &= \sqrt{I_{A(1)}^2 + I_{A(3)}^2 + I_{A(5)}^2} = \\
&= \sqrt{3.328^2 + 2.787^2 + 1.473^2} = 4.572(\text{А}); \\
I_{PA2} &= 3 \cdot I_{A(3)} = 3 \cdot 2.787 = 8.356(\text{А}).
\end{aligned} \tag{3.6.4}$$

Запишемо миттєві значення струмів електричної схеми

$$\begin{aligned}
i_{A(1)}(t) &= 3.328\sqrt{2}(\omega_{(1)}t + 56.31^\circ)(\text{А}); \\
i_{A(3)}(t) &= 2.785\sqrt{2}(3\omega_{(1)}t + 23.199^\circ)(\text{А}); \\
i_{A(5)}(t) &= 1.437\sqrt{2}(5\omega_{(1)}t - 73.301^\circ)(\text{А}); \\
i_{N(3)}(t) &= 8.356\sqrt{2}(3\omega_{(1)}t - 23.199^\circ)(\text{А}).
\end{aligned}$$

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Корощенко О.В. «Теоретичні основи електротехніки. Збірник задач: навчальний посібник» / укл. О.В. Корощенко, В.Ф. Денник, О.А. Журавель та ін.; за заг.ред. О.В. Корощенка.- Донецьк, ДВНЗ «ДонНТУ», 2012.- 673 с.

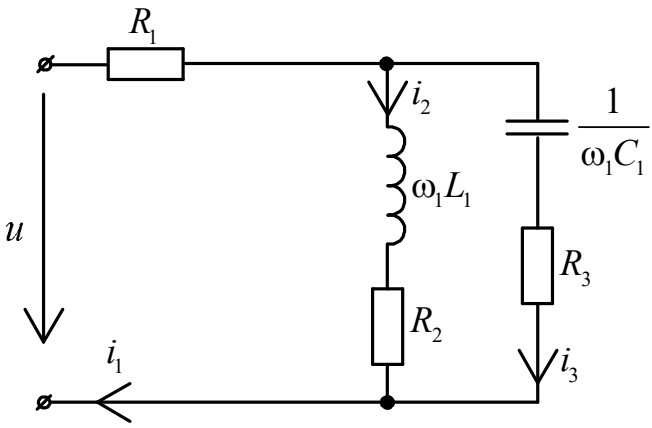
2. Щерба А.А Симетричні складові та вищі гармоніки у трифазних колах: Метод. вказівки до виконання розрахункових робіт з курсу «Теоретична електротехніка» / А.А Щерба, І.А Курило, І.Н Намацалюк // для студ. напрямів підготовки 0906 «Електротехніка». – К.: НТУУ «КПІ», 2007. – 76 с.

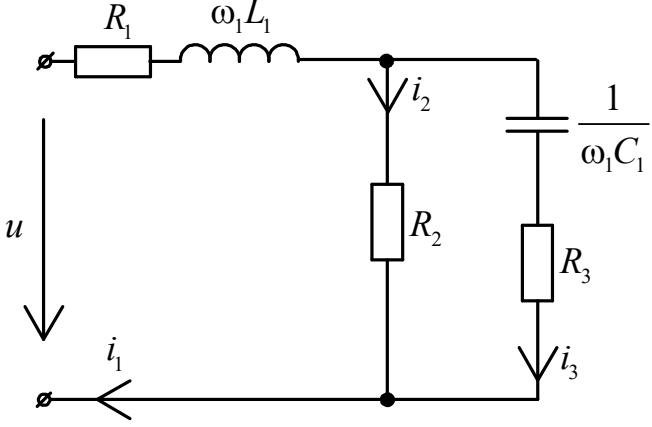
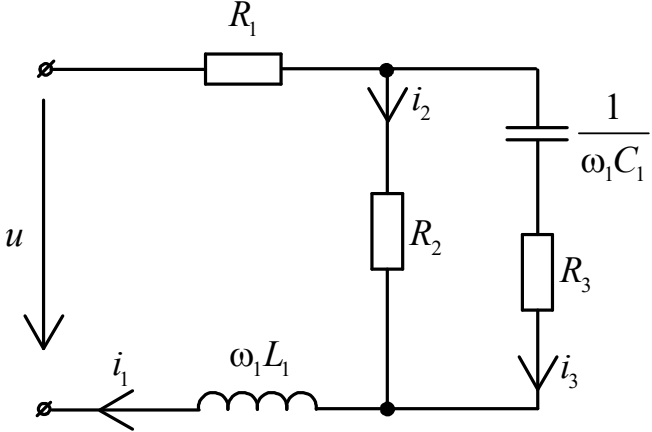
Завдання для самостійного розрахунку лінійного електричного кола з несинусоїдною ЕРС

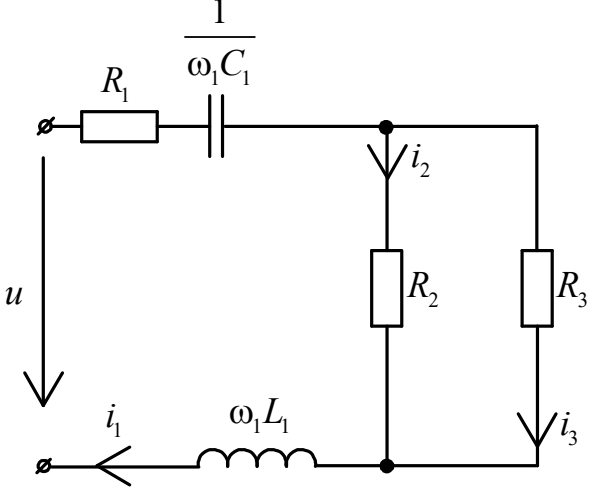
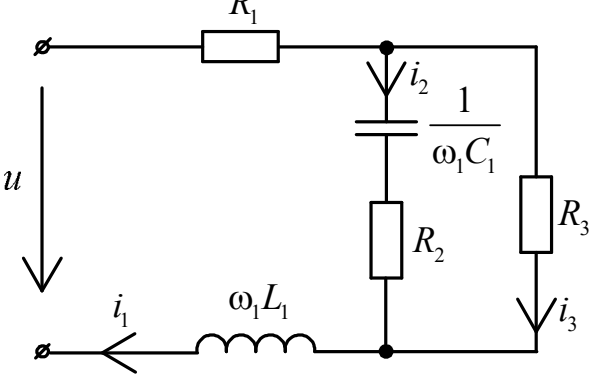
(варіанти вибрати згідно списку групи)

Задача №3.П.1

Варіант №1	
<p>Завдання:</p> <p>1. Розрахувати діюче та миттєві струмів, якщо напруга живлення</p> $u = 50 + 200 \sin(\omega_1 t + 45^\circ) + 100 \sin(3\omega_1 t - 60^\circ) \text{ (В)}.$ <p>2. Визначити потужність спотворення T та коефіцієнт потужності λ.</p>	<p>$R_1, \text{ Ом}$ 6</p> <p>$R_2, \text{ Ом}$ 8</p> <p>$R_3, \text{ Ом}$ 10</p> <p>$\omega_1 L_1, \text{ Ом}$ 12</p> <p>$1/(\omega_1 C_1),$ 20</p> <p>Ом</p>
Рисунок 1	

Варіант №2											
<p>Завдання:</p> <p>1. Розрахувати діюче та миттєві струмів, якщо напруга живлення</p> $u = 50 + 200\sin(\omega_{(1)}t + 45^\circ) + 100\sin(3\omega_{(1)}t - 60^\circ) \text{ (В)}.$ <p>2. Визначити потужність спотворення T та коефіцієнт потужності λ.</p>	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="padding: 2px;">$R_1, \text{ Ом}$</td> <td style="padding: 2px; text-align: right;">6</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">$R_2, \text{ Ом}$</td> <td style="padding: 2px; text-align: right;">8</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">$R_3, \text{ Ом}$</td> <td style="padding: 2px; text-align: right;">10</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">$\omega_1 L_1, \text{ Ом}$</td> <td style="padding: 2px; text-align: right;">12</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">$1/(\omega_1 C_1), \text{ Ом}$</td> <td style="padding: 2px; text-align: right;">20</td> </tr> </table>	$R_1, \text{ Ом}$	6	$R_2, \text{ Ом}$	8	$R_3, \text{ Ом}$	10	$\omega_1 L_1, \text{ Ом}$	12	$1/(\omega_1 C_1), \text{ Ом}$	20
$R_1, \text{ Ом}$	6										
$R_2, \text{ Ом}$	8										
$R_3, \text{ Ом}$	10										
$\omega_1 L_1, \text{ Ом}$	12										
$1/(\omega_1 C_1), \text{ Ом}$	20										
 <p style="text-align: center;">Рисунок 1</p>											
Варіант №3											
<p>Завдання:</p> <p>1. Розрахувати діюче та миттєві струмів, якщо напруга живлення</p> $u = 50 + 200\sin(\omega_{(1)}t + 45^\circ) + 100\sin(3\omega_{(1)}t - 60^\circ) \text{ (В)}.$ <p>2. Визначити потужність спотворення T та коефіцієнт потужності λ.</p>	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="padding: 2px;">$R_1, \text{ Ом}$</td> <td style="padding: 2px; text-align: right;">6</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">$R_2, \text{ Ом}$</td> <td style="padding: 2px; text-align: right;">8</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">$R_3, \text{ Ом}$</td> <td style="padding: 2px; text-align: right;">10</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">$\omega_1 L_1, \text{ Ом}$</td> <td style="padding: 2px; text-align: right;">12</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">$1/(\omega_1 C_1), \text{ Ом}$</td> <td style="padding: 2px; text-align: right;">20</td> </tr> </table>	$R_1, \text{ Ом}$	6	$R_2, \text{ Ом}$	8	$R_3, \text{ Ом}$	10	$\omega_1 L_1, \text{ Ом}$	12	$1/(\omega_1 C_1), \text{ Ом}$	20
$R_1, \text{ Ом}$	6										
$R_2, \text{ Ом}$	8										
$R_3, \text{ Ом}$	10										
$\omega_1 L_1, \text{ Ом}$	12										
$1/(\omega_1 C_1), \text{ Ом}$	20										

 <p style="text-align: center;">Рисунок 1</p>	Ом										
Варіант №4											
<p>Завдання:</p> <p>1. Розрахувати діюче та миттєві струмів, якщо напруга живлення</p> $u = 50 + 200\sin(\omega_{(1)}t + 45^\circ) + 100\sin(3\omega_{(1)}t - 60^\circ) \text{ (В)}.$ <p>2. Визначити потужність спотворення T та коефіцієнт потужності λ.</p>	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tbody> <tr> <td style="padding: 2px;">$R_1, \text{ Ом}$</td> <td style="text-align: right; padding: 2px;">6</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">$R_2, \text{ Ом}$</td> <td style="text-align: right; padding: 2px;">8</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">$R_3, \text{ Ом}$</td> <td style="text-align: right; padding: 2px;">10</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">$\omega_1 L_1, \text{ Ом}$</td> <td style="text-align: right; padding: 2px;">12</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">$1/(\omega_1 C_1), \text{ Ом}$</td> <td style="text-align: right; padding: 2px;">20</td> </tr> </tbody> </table>	$R_1, \text{ Ом}$	6	$R_2, \text{ Ом}$	8	$R_3, \text{ Ом}$	10	$\omega_1 L_1, \text{ Ом}$	12	$1/(\omega_1 C_1), \text{ Ом}$	20
$R_1, \text{ Ом}$	6										
$R_2, \text{ Ом}$	8										
$R_3, \text{ Ом}$	10										
$\omega_1 L_1, \text{ Ом}$	12										
$1/(\omega_1 C_1), \text{ Ом}$	20										
 <p style="text-align: center;">Рисунок 1</p>	Ом										
Варіант №5											
<p>Завдання:</p> <p>1. Розрахувати діюче та миттєві струмів, якщо напруга живлення</p>	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tbody> <tr> <td style="padding: 2px;">$R_1, \text{ Ом}$</td> <td style="text-align: right; padding: 2px;">6</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">$R_2, \text{ Ом}$</td> <td style="text-align: right; padding: 2px;">8</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">$R_3, \text{ Ом}$</td> <td style="text-align: right; padding: 2px;">10</td> </tr> </tbody> </table>	$R_1, \text{ Ом}$	6	$R_2, \text{ Ом}$	8	$R_3, \text{ Ом}$	10				
$R_1, \text{ Ом}$	6										
$R_2, \text{ Ом}$	8										
$R_3, \text{ Ом}$	10										

<p>$u = 50 + 200\sin(\omega_1 t + 45^\circ) + 100\sin(3\omega_1 t - 60^\circ)$ (В).</p> <p>2. Визначити потужність спотворення T та коефіцієнт потужності λ.</p>	<p>$\omega_1 L_1$, Ом 12</p> <p>$1/(\omega_1 C_1)$, Ом 20</p>
 <p style="text-align: center;">Рисунок 1</p>	
<p style="text-align: center;">Варіант №6</p> <p>Завдання:</p> <p>1. Розрахувати діюче та миттєві струмів, якщо напруга живлення</p> <p>$u = 50 + 200\sin(\omega_1 t + 45^\circ) + 100\sin(3\omega_1 t - 60^\circ)$ (В).</p> <p>2. Визначити потужність спотворення T та коефіцієнт потужності λ.</p>	<p>R_1, Ом 6</p> <p>R_2, Ом 8</p> <p>R_3, Ом 10</p> <p>$\omega_1 L_1$, Ом 12</p> <p>$1/(\omega_1 C_1)$, Ом 20</p>
 <p style="text-align: center;">Рисунок 1</p>	

Варіант №7

Завдання:

1. Розрахувати діюче та миттєві струмів, якщо напруга живлення

$$u = 200\sin(\omega_1 t + 45^\circ) + 100\sin(2\omega_1 t - 60^\circ) \text{ (В)}.$$

2. Визначити потужність спотворення T та коефіцієнт потужності λ .

$R_1, \text{ Ом}$ 6
 $R_2, \text{ Ом}$ 8

$R_3, \text{ Ом}$ 10
 $\omega_1 L_1, \text{ Ом}$ 12

$1/(\omega_1 C_1),$ 20
 Ом

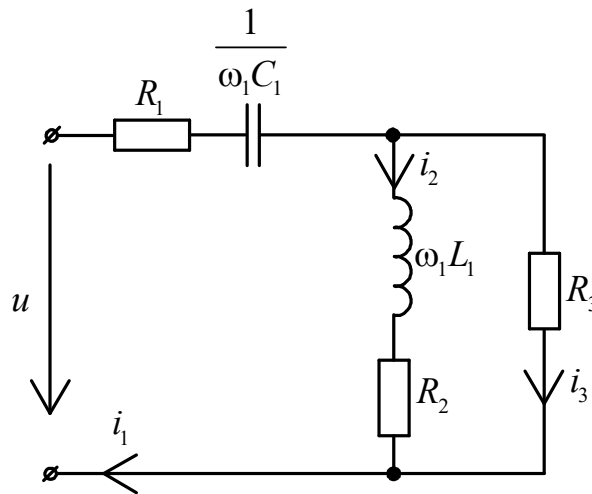


Рисунок 1

Варіант №8

Завдання:

1. Розрахувати діюче та миттєві струмів, якщо напруга живлення

$$u = 200\sin(\omega_1 t + 45^\circ) + 100\sin(2\omega_1 t - 60^\circ) \text{ (В)}.$$

2. Визначити потужність спотворення T та коефіцієнт потужності λ .

$R_1, \text{ Ом}$ 6
 $R_2, \text{ Ом}$ 8

$R_3, \text{ Ом}$ 10
 $\omega_1 L_1, \text{ Ом}$ 12

$1/(\omega_1 C_1),$ 20
 Ом

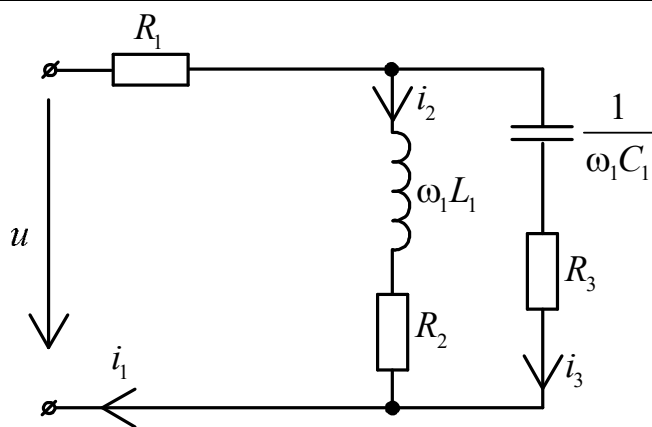


Рисунок 1

Варіант №9

Завдання:

1. Розрахувати діюче та миттєві струмів, якщо напруга живлення

$$u = 200 \sin(\omega_1 t + 45^\circ) + 100 \sin(2\omega_1 t - 60^\circ) \text{ (В)}.$$

2. Визначити потужність спотворення T та коефіцієнт потужності λ .

R_1 , Ом	6
R_2 , Ом	8
R_3 , Ом	10
$\omega_1 L_1$, Ом	12
$1/(\omega_1 C_1)$, Ом	20

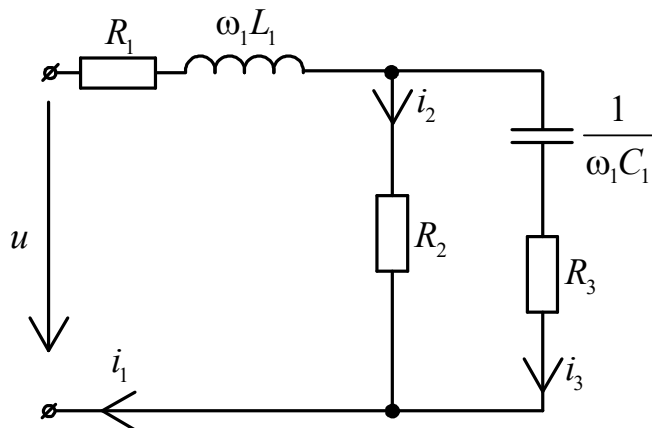


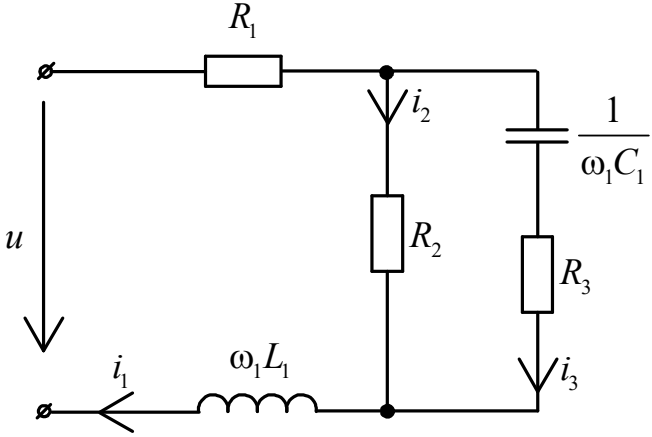
Рисунок 1

Варіант №10

Завдання:

1. Розрахувати діюче та миттєві струмів, якщо

R_1 , Ом	6
------------	---

<p>напряга живлення</p> $u = 200\sin(\omega_{(1)}t + 45^\circ) + 100\sin(2\omega_{(1)}t - 60^\circ) \text{ (В)}.$ <p>2. Визначити потужність спотворення T та коефіцієнт потужності λ.</p>	<table> <tr><td>$R_2, \text{ Ом}$</td><td>8</td></tr> <tr><td>$R_3, \text{ Ом}$</td><td>10</td></tr> <tr><td>$\omega_1 L_1, \text{ Ом}$</td><td>12</td></tr> <tr><td>$1/(\omega_1 C_1), \text{ Ом}$</td><td>20</td></tr> </table>	$R_2, \text{ Ом}$	8	$R_3, \text{ Ом}$	10	$\omega_1 L_1, \text{ Ом}$	12	$1/(\omega_1 C_1), \text{ Ом}$	20		
$R_2, \text{ Ом}$	8										
$R_3, \text{ Ом}$	10										
$\omega_1 L_1, \text{ Ом}$	12										
$1/(\omega_1 C_1), \text{ Ом}$	20										
 <p style="text-align: center;">Рисунок 1</p>											
<p style="text-align: center;">Варіант №11</p> <p>Завдання:</p> <p>1. Розрахувати діюче та миттєві струмів, якщо напряга живлення</p> $u = 200\sin(\omega_{(1)}t + 45^\circ) + 100\sin(2\omega_{(1)}t - 60^\circ) \text{ (В)}.$ <p>2. Визначити потужність спотворення T та коефіцієнт потужності λ.</p>	<table> <tr><td>$R_1, \text{ Ом}$</td><td>6</td></tr> <tr><td>$R_2, \text{ Ом}$</td><td>8</td></tr> <tr><td>$R_3, \text{ Ом}$</td><td>10</td></tr> <tr><td>$\omega_1 L_1, \text{ Ом}$</td><td>12</td></tr> <tr><td>$1/(\omega_1 C_1), \text{ Ом}$</td><td>20</td></tr> </table>	$R_1, \text{ Ом}$	6	$R_2, \text{ Ом}$	8	$R_3, \text{ Ом}$	10	$\omega_1 L_1, \text{ Ом}$	12	$1/(\omega_1 C_1), \text{ Ом}$	20
$R_1, \text{ Ом}$	6										
$R_2, \text{ Ом}$	8										
$R_3, \text{ Ом}$	10										
$\omega_1 L_1, \text{ Ом}$	12										
$1/(\omega_1 C_1), \text{ Ом}$	20										

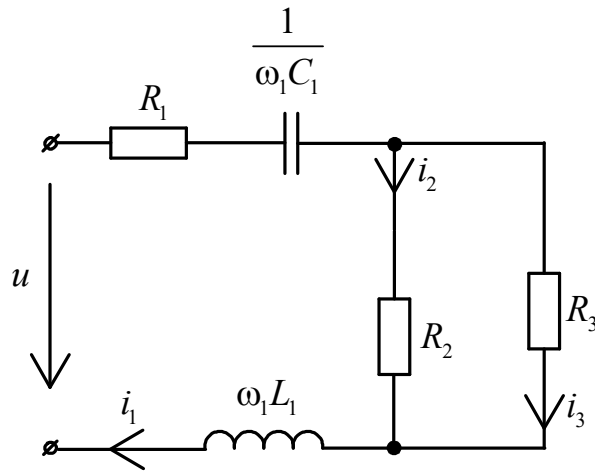


Рисунок 1

Варіант №12

Завдання:

1. Розрахувати діюче та миттєві струмів, якщо напруга живлення

$$u = 200 \sin(\omega_1 t + 45^\circ) + 100 \sin(2\omega_1 t - 60^\circ) \text{ (В)}.$$

2. Визначити потужність спотворення T та коефіцієнт потужності λ .

$R_1, \text{ Ом} \quad 6$

$R_2, \text{ Ом} \quad 8$

$R_3, \text{ Ом} \quad 10$

$\omega_1 L_1, \text{ Ом} \quad 12$

$1/(\omega_1 C_1), \quad 20$
Ом

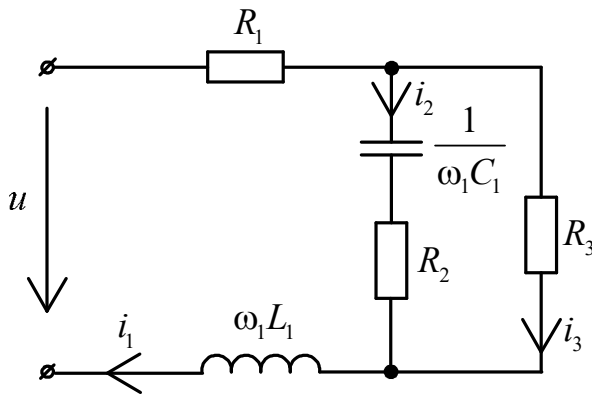


Рисунок 1

Варіант №13

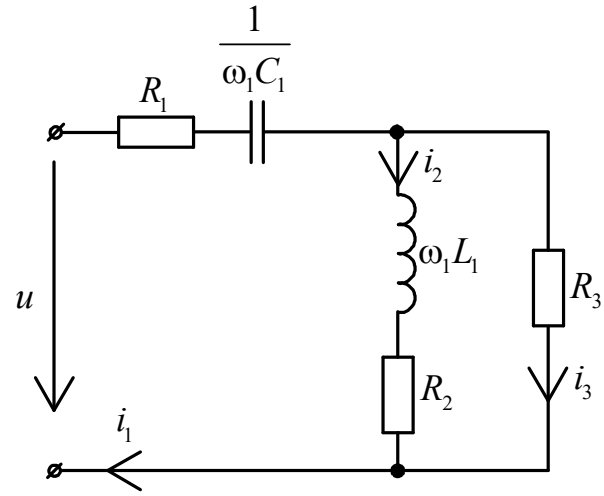
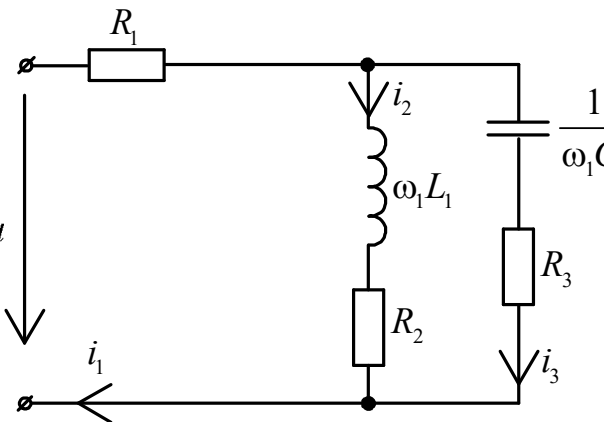
Завдання:

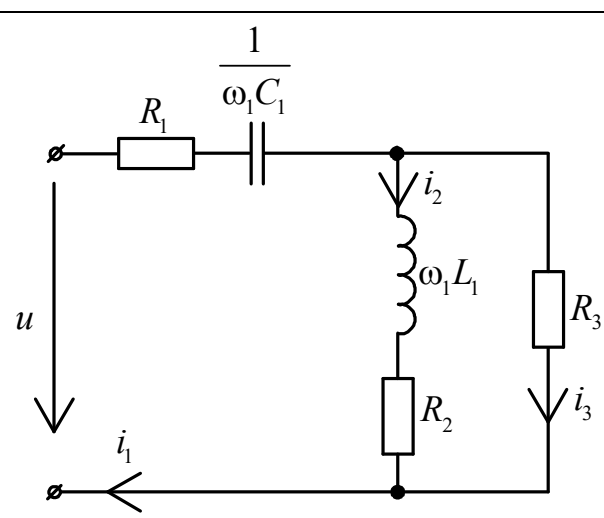
1. Розрахувати діюче та миттєві струмів, якщо напруга живлення

$R_1, \text{ Ом} \quad 6$

$R_2, \text{ Ом} \quad 8$

$R_3, \text{ Ом} \quad 10$

<p>$u = 50 + 200 \cos(\omega_{(1)}t) + 100 \cos(2\omega_{(1)}t)$ (В).</p> <p>2. Визначити потужність спотворення T та коефіцієнт потужності λ.</p>	<p>$\omega_1 L_1$, Ом 12</p> <p>$1/(\omega_1 C_1)$, Ом 20</p>
 <p style="text-align: center;">Рисунок 1</p>	
Варіант №14	
<p>Завдання:</p> <p>1. Розрахувати діюче та миттєві струмів, якщо напруга живлення</p> <p>$u = 50 + 200 \cos(\omega_{(1)}t) + 100 \cos(2\omega_{(1)}t)$ (В).</p> <p>2. Визначити потужність спотворення T та коефіцієнт потужності λ.</p>	<p>R_1, Ом 6</p> <p>R_2, Ом 8</p> <p>R_3, Ом 10</p> <p>$\omega_1 L_1$, Ом 12</p> <p>$1/(\omega_1 C_1)$, Ом 20</p>
 <p style="text-align: center;">Рисунок 1</p>	

Варіант №15											
<p>Завдання:</p> <p>1. Розрахувати діюче та миттєві струмів, якщо напруга живлення</p> $u = 100 + 200\sin(\omega_{(1)}t + 90^\circ) + 200\sin(3\omega_{(1)}t - 30^\circ) \text{ (В)}.$ <p>2. Визначити потужність спотворення T та коефіцієнт потужності λ.</p>	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="padding: 2px;">$R_1, \text{ Ом}$</td> <td style="padding: 2px; text-align: right;">6</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">$R_2, \text{ Ом}$</td> <td style="padding: 2px; text-align: right;">8</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">$R_3, \text{ Ом}$</td> <td style="padding: 2px; text-align: right;">10</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">$\omega_1 L_1, \text{ Ом}$</td> <td style="padding: 2px; text-align: right;">12</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">$1/(\omega_1 C_1), \text{ Ом}$</td> <td style="padding: 2px; text-align: right;">20</td> </tr> </table>	$R_1, \text{ Ом}$	6	$R_2, \text{ Ом}$	8	$R_3, \text{ Ом}$	10	$\omega_1 L_1, \text{ Ом}$	12	$1/(\omega_1 C_1), \text{ Ом}$	20
$R_1, \text{ Ом}$	6										
$R_2, \text{ Ом}$	8										
$R_3, \text{ Ом}$	10										
$\omega_1 L_1, \text{ Ом}$	12										
$1/(\omega_1 C_1), \text{ Ом}$	20										
 <p style="text-align: center;">Рисунок 1</p>											
Варіант №16											
<p>Завдання:</p> <p>1. Розрахувати діюче та миттєві струмів, якщо напруга живлення</p> $u = 100 + 300\sin(\omega_{(1)}t + 90^\circ) + 200\sin(3\omega_{(1)}t - 30^\circ) \text{ (В)}.$ <p>2. Визначити потужність спотворення T та коефіцієнт потужності λ.</p>	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="padding: 2px;">$R_1, \text{ Ом}$</td> <td style="padding: 2px; text-align: right;">6</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">$R_2, \text{ Ом}$</td> <td style="padding: 2px; text-align: right;">8</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">$R_3, \text{ Ом}$</td> <td style="padding: 2px; text-align: right;">10</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">$\omega_1 L_1, \text{ Ом}$</td> <td style="padding: 2px; text-align: right;">12</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">$1/(\omega_1 C_1), \text{ Ом}$</td> <td style="padding: 2px; text-align: right;">20</td> </tr> </table>	$R_1, \text{ Ом}$	6	$R_2, \text{ Ом}$	8	$R_3, \text{ Ом}$	10	$\omega_1 L_1, \text{ Ом}$	12	$1/(\omega_1 C_1), \text{ Ом}$	20
$R_1, \text{ Ом}$	6										
$R_2, \text{ Ом}$	8										
$R_3, \text{ Ом}$	10										
$\omega_1 L_1, \text{ Ом}$	12										
$1/(\omega_1 C_1), \text{ Ом}$	20										

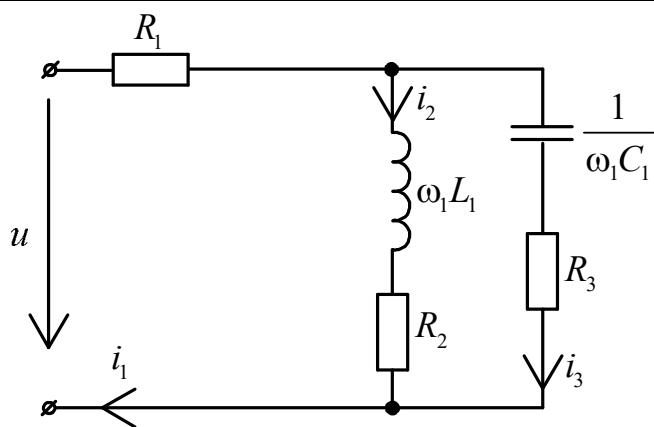


Рисунок 1

Варіант №17

Завдання:

1. Розрахувати діюче та миттєві струмів, якщо напруга живлення

$$u = 100 + 300\sin(\omega_{(1)}t + 90^\circ) + 200\sin(3\omega_{(1)}t - 30^\circ) \text{ (В)}.$$

2. Визначити потужність спотворення T та коефіцієнт потужності λ .

R_1 , Ом	6
R_2 , Ом	8
R_3 , Ом	10
$\omega_1 L_1$, Ом	12
$1/(\omega_1 C_1)$, Ом	20

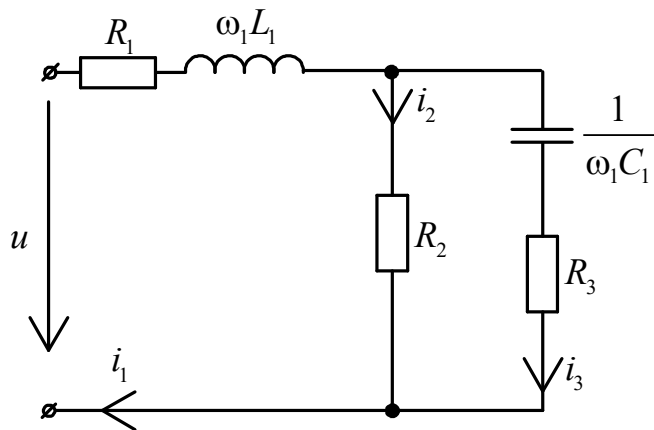


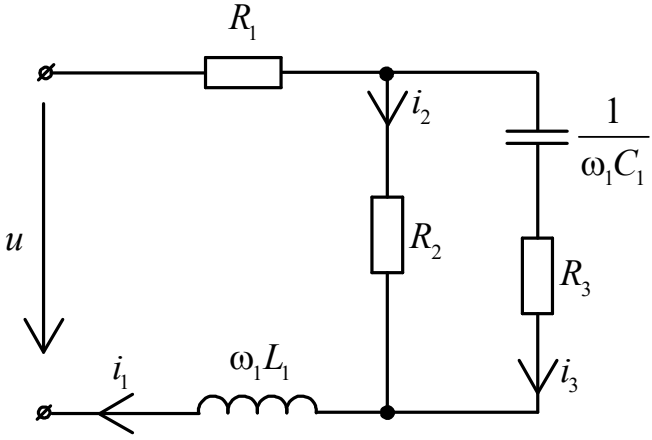
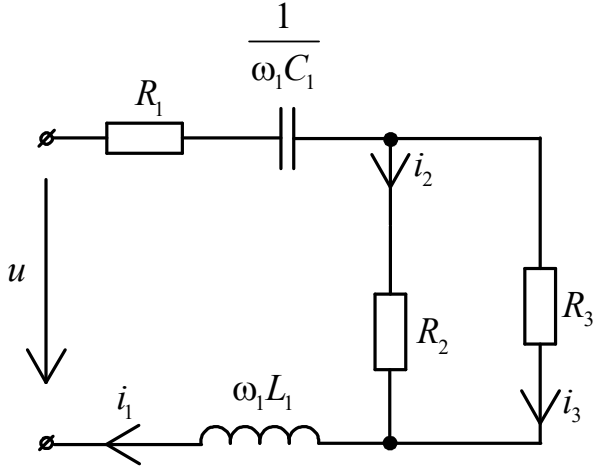
Рисунок 1

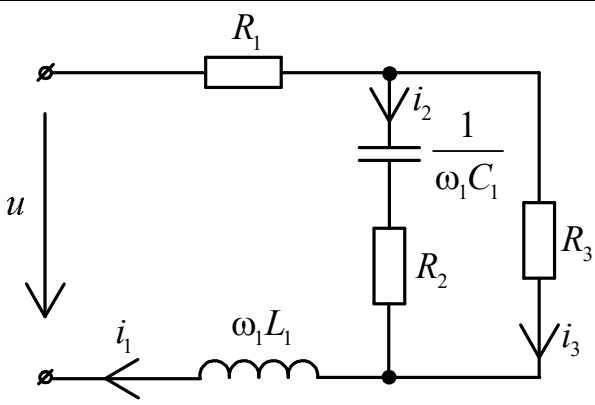
Варіант №18

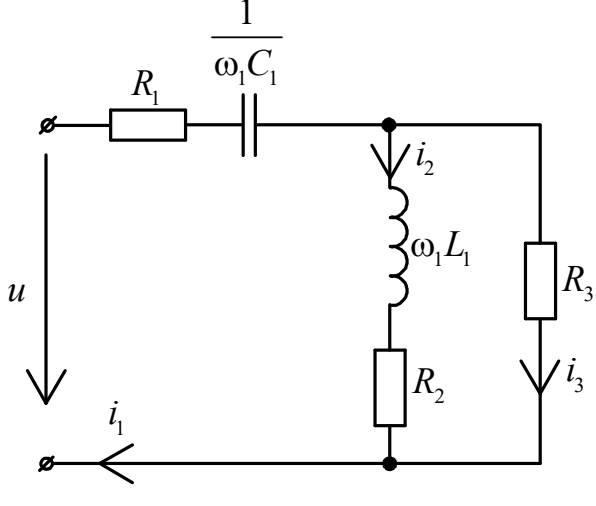
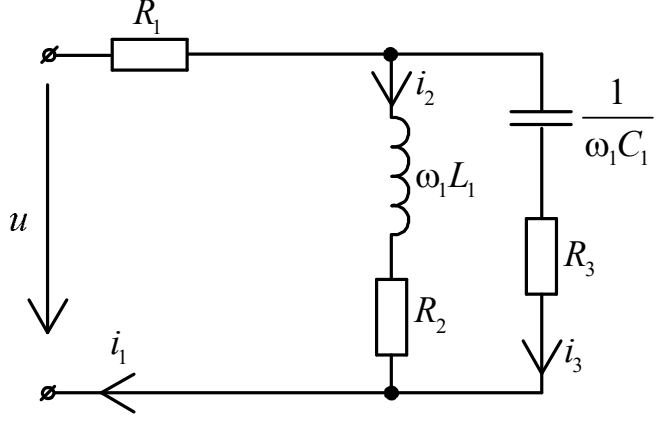
Завдання:

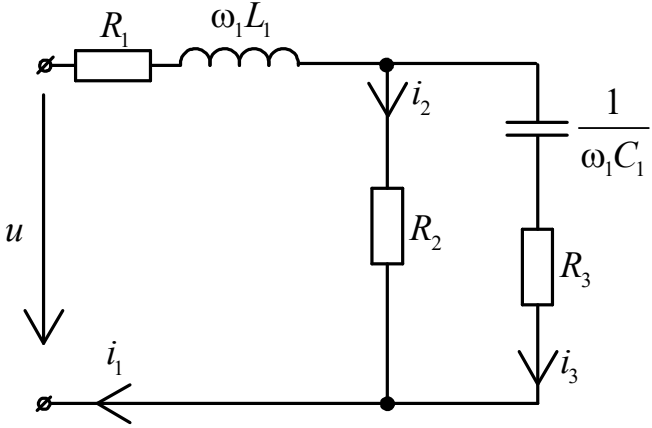
1. Розрахувати діюче та миттєві струмів, якщо напруга живлення

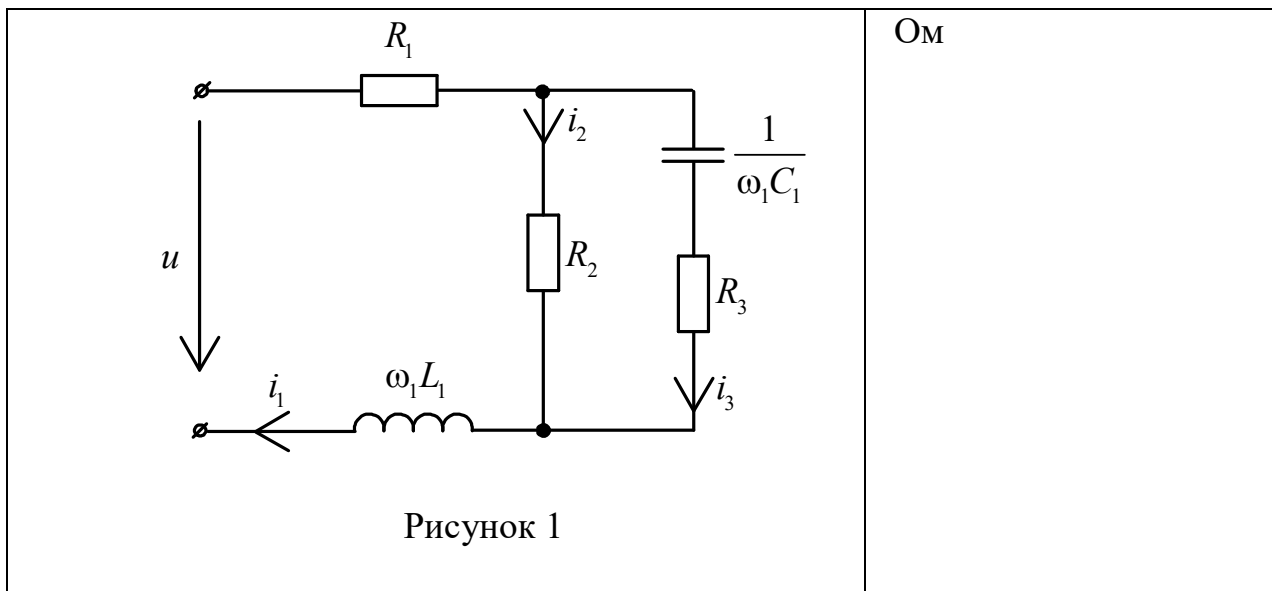
R_1 , Ом	6
R_2 , Ом	8
R_3 , Ом	10

<p>$u = 100 + 300\sin(\omega_{(1)}t + 90^\circ) + 200\sin(3\omega_{(1)}t - 30^\circ)$ (В).</p> <p>2. Визначити потужність спотворення T та коефіцієнт потужності λ.</p>	<p>$\omega_1 L_1$, Ом 12</p> <p>$1/(\omega_1 C_1)$, Ом 20</p>
 <p style="text-align: center;">Рисунок 1</p>	
Варіант №19	
<p>Завдання:</p> <p>1. Розрахувати діюче та миттєві струмів, якщо напруга живлення</p> <p>$u = 100 + 300\sin(\omega_{(1)}t + 90^\circ) + 200\sin(3\omega_{(1)}t - 30^\circ)$ (В).</p> <p>2. Визначити потужність спотворення T та коефіцієнт потужності λ.</p>	<p>R_1, Ом 6</p> <p>R_2, Ом 8</p> <p>R_3, Ом 10</p> <p>$\omega_1 L_1$, Ом 12</p> <p>$1/(\omega_1 C_1)$, Ом 20</p>
 <p style="text-align: center;">Рисунок 1</p>	

Варіант №20											
<p>Завдання:</p> <p>1. Розрахувати діюче та миттєві струмів, якщо напруга живлення</p> $u = 100 + 300\sin(\omega_{(1)}t + 90^\circ) + 200\sin(3\omega_{(1)}t - 30^\circ) \text{ (В)}.$ <p>2. Визначити потужність спотворення T та коефіцієнт потужності λ.</p>	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="padding: 2px;">$R_1, \text{ Ом}$</td> <td style="text-align: right; padding: 2px;">6</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">$R_2, \text{ Ом}$</td> <td style="text-align: right; padding: 2px;">8</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">$R_3, \text{ Ом}$</td> <td style="text-align: right; padding: 2px;">10</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">$\omega_1 L_1, \text{ Ом}$</td> <td style="text-align: right; padding: 2px;">12</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">$1/(\omega_1 C_1), \text{ Ом}$</td> <td style="text-align: right; padding: 2px;">20</td> </tr> </table>	$R_1, \text{ Ом}$	6	$R_2, \text{ Ом}$	8	$R_3, \text{ Ом}$	10	$\omega_1 L_1, \text{ Ом}$	12	$1/(\omega_1 C_1), \text{ Ом}$	20
$R_1, \text{ Ом}$	6										
$R_2, \text{ Ом}$	8										
$R_3, \text{ Ом}$	10										
$\omega_1 L_1, \text{ Ом}$	12										
$1/(\omega_1 C_1), \text{ Ом}$	20										
 <p style="text-align: center;">Рисунок 1</p>											
Варіант №21											
<p>Завдання:</p> <p>1. Розрахувати діюче та миттєві струмів, якщо напруга живлення</p> $u = 100 + 300\sin(\omega_{(1)}t + 90^\circ) + 200\sin(3\omega_{(1)}t - 30^\circ) \text{ (В)}.$ <p>2. Визначити потужність спотворення T та коефіцієнт потужності λ.</p>	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="padding: 2px;">$R_1, \text{ Ом}$</td> <td style="text-align: right; padding: 2px;">6</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">$R_2, \text{ Ом}$</td> <td style="text-align: right; padding: 2px;">8</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">$R_3, \text{ Ом}$</td> <td style="text-align: right; padding: 2px;">10</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">$\omega_1 L_1, \text{ Ом}$</td> <td style="text-align: right; padding: 2px;">12</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">$1/(\omega_1 C_1), \text{ Ом}$</td> <td style="text-align: right; padding: 2px;">20</td> </tr> </table>	$R_1, \text{ Ом}$	6	$R_2, \text{ Ом}$	8	$R_3, \text{ Ом}$	10	$\omega_1 L_1, \text{ Ом}$	12	$1/(\omega_1 C_1), \text{ Ом}$	20
$R_1, \text{ Ом}$	6										
$R_2, \text{ Ом}$	8										
$R_3, \text{ Ом}$	10										
$\omega_1 L_1, \text{ Ом}$	12										
$1/(\omega_1 C_1), \text{ Ом}$	20										

 <p style="text-align: center;">Рисунок 1</p>	Ом												
<p style="text-align: center;">Варіант №22</p> <p>Завдання:</p> <p>1. Розрахувати діюче та миттєві струмів, якщо напруга живлення</p> $u = 100 + 300 \sin(\omega_{(1)} t + 90^\circ) + 200 \sin(3\omega_{(1)} t - 30^\circ) \text{ (В)}.$ <p>2. Визначити потужність спотворення T та коефіцієнт потужності λ.</p>	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="padding: 2px;">$R_1, \text{ Ом}$</td> <td style="text-align: right; padding: 2px;">6</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">$R_2, \text{ Ом}$</td> <td style="text-align: right; padding: 2px;">8</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">$R_3, \text{ Ом}$</td> <td style="text-align: right; padding: 2px;">10</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">$\omega_1 L_1, \text{ Ом}$</td> <td style="text-align: right; padding: 2px;">12</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">$1/(\omega_1 C_1),$</td> <td style="text-align: right; padding: 2px;">20</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">Ом</td> <td></td> </tr> </table>	$R_1, \text{ Ом}$	6	$R_2, \text{ Ом}$	8	$R_3, \text{ Ом}$	10	$\omega_1 L_1, \text{ Ом}$	12	$1/(\omega_1 C_1),$	20	Ом	
$R_1, \text{ Ом}$	6												
$R_2, \text{ Ом}$	8												
$R_3, \text{ Ом}$	10												
$\omega_1 L_1, \text{ Ом}$	12												
$1/(\omega_1 C_1),$	20												
Ом													
 <p style="text-align: center;">Рисунок 1</p>													
<p style="text-align: center;">Варіант №23</p> <p>Завдання:</p> <p>1. Розрахувати діюче та миттєві струмів, якщо</p>	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="padding: 2px;">$R_1, \text{ Ом}$</td> <td style="text-align: right; padding: 2px;">6</td> </tr> </table>	$R_1, \text{ Ом}$	6										
$R_1, \text{ Ом}$	6												

<p>напряга живлення</p> $u = 100 + 300\sin(\omega_{(1)}t + 90^\circ) + 200\sin(3\omega_{(1)}t - 30^\circ) \text{ (В)}.$ <p>2. Визначити потужність спотворення T та коефіцієнт потужності λ.</p>	<table> <tr> <td>$R_2, \text{ Ом}$</td> <td>8</td> </tr> <tr> <td>$R_3, \text{ Ом}$</td> <td>10</td> </tr> <tr> <td>$\omega_1 L_1, \text{ Ом}$</td> <td>12</td> </tr> <tr> <td>$1/(\omega_1 C_1), \text{ Ом}$</td> <td>20</td> </tr> </table>	$R_2, \text{ Ом}$	8	$R_3, \text{ Ом}$	10	$\omega_1 L_1, \text{ Ом}$	12	$1/(\omega_1 C_1), \text{ Ом}$	20		
$R_2, \text{ Ом}$	8										
$R_3, \text{ Ом}$	10										
$\omega_1 L_1, \text{ Ом}$	12										
$1/(\omega_1 C_1), \text{ Ом}$	20										
<div style="text-align: center;">  <p>Рисунок 1</p> </div>											
<p style="text-align: center;">Варіант №24</p> <p>Завдання:</p> <p>1. Розрахувати діюче та миттєві струмів, якщо напряга живлення</p> $u = 100 + 300\sin(\omega_{(1)}t + 90^\circ) + 200\sin(3\omega_{(1)}t - 30^\circ) \text{ (В)}.$ <p>2. Визначити потужність спотворення T та коефіцієнт потужності λ.</p>	<table> <tr> <td>$R_1, \text{ Ом}$</td> <td>6</td> </tr> <tr> <td>$R_2, \text{ Ом}$</td> <td>8</td> </tr> <tr> <td>$R_3, \text{ Ом}$</td> <td>10</td> </tr> <tr> <td>$\omega_1 L_1, \text{ Ом}$</td> <td>12</td> </tr> <tr> <td>$1/(\omega_1 C_1), \text{ Ом}$</td> <td>20</td> </tr> </table>	$R_1, \text{ Ом}$	6	$R_2, \text{ Ом}$	8	$R_3, \text{ Ом}$	10	$\omega_1 L_1, \text{ Ом}$	12	$1/(\omega_1 C_1), \text{ Ом}$	20
$R_1, \text{ Ом}$	6										
$R_2, \text{ Ом}$	8										
$R_3, \text{ Ом}$	10										
$\omega_1 L_1, \text{ Ом}$	12										
$1/(\omega_1 C_1), \text{ Ом}$	20										



Ом

Варіант №25

Завдання:

1. Розрахувати діюче та миттєві струмів, якщо напруга живлення

$$u = 100 + 300 \sin(\omega_{(1)} t + 90^\circ) + 200 \sin(3\omega_{(1)} t - 30^\circ) \text{ (В)}.$$

2. Визначити потужність спотворення T та коефіцієнт потужності λ .

R_1 , Ом 6

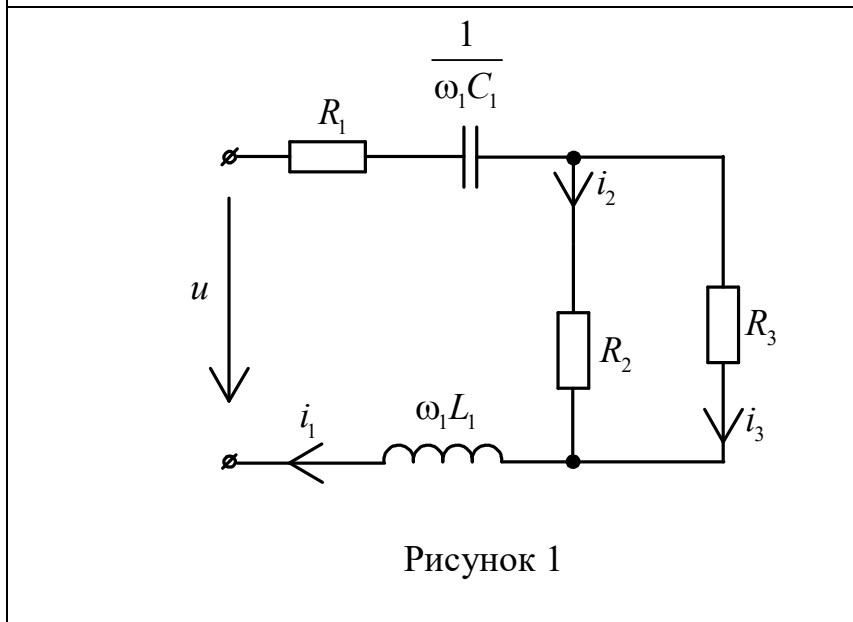
R_2 , Ом 8

R_3 , Ом 10

$\omega_1 L_1$, Ом 12

$1/(\omega_1 C_1)$, 20

Ом

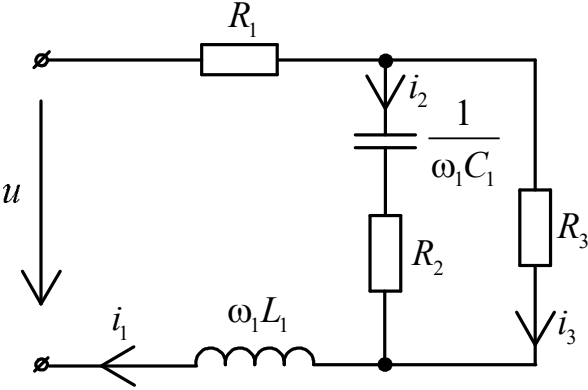
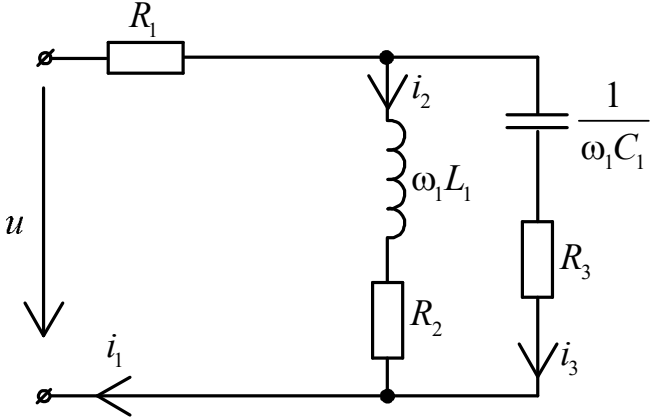


Варіант №26

Завдання:

1. Розрахувати діюче та миттєві струмів, якщо

R_1 , Ом 6

<p>напряга живлення</p> $u = 100 + 300\sin(\omega_{(1)}t + 90^\circ) + 200\sin(3\omega_{(1)}t - 30^\circ) \text{ (В)}.$ <p>2. Визначити потужність спотворення T та коефіцієнт потужності λ.</p>	<p>$R_2, \text{ Ом}$ 8</p> <p>$R_3, \text{ Ом}$ 10</p> <p>$\omega_1 L_1, \text{ Ом}$ 12</p> <p>$1/(\omega_1 C_1),$ 20</p> <p>Ом</p>
 <p style="text-align: center;">Рисунок 1</p>	
Варіант №27	
<p>Завдання:</p> <p>1. Розрахувати діюче та миттєві струмів, якщо напряга живлення</p> $u = 100 + 300\sin(\omega_{(1)}t + 90^\circ) + 200\sin(3\omega_{(1)}t - 30^\circ) \text{ (В)}.$ <p>2. Визначити потужність спотворення T та коефіцієнт потужності λ.</p>	<p>$R_1, \text{ Ом}$ 6</p> <p>$R_2, \text{ Ом}$ 8</p> <p>$R_3, \text{ Ом}$ 10</p> <p>$\omega_1 L_1, \text{ Ом}$ 12</p> <p>$1/(\omega_1 C_1),$ 20</p> <p>Ом</p>
 <p style="text-align: center;">Рисунок 1</p>	

Варіант №28

Завдання:

1. Розрахувати діюче та миттєві струмів, якщо напруга живлення
 $u = 100 + 300 \sin(\omega_{(1)}t + 90^\circ) + 200 \sin(5\omega_{(1)}t - 30^\circ)$ (В).

2. Визначити потужність спотворення T та коефіцієнт потужності λ .

$R_1, \text{ Ом}$	6
$R_2, \text{ Ом}$	8
$R_3, \text{ Ом}$	10
$\omega_1 L_1, \text{ Ом}$	12
$1/(\omega_1 C_1), \text{ Ом}$	20

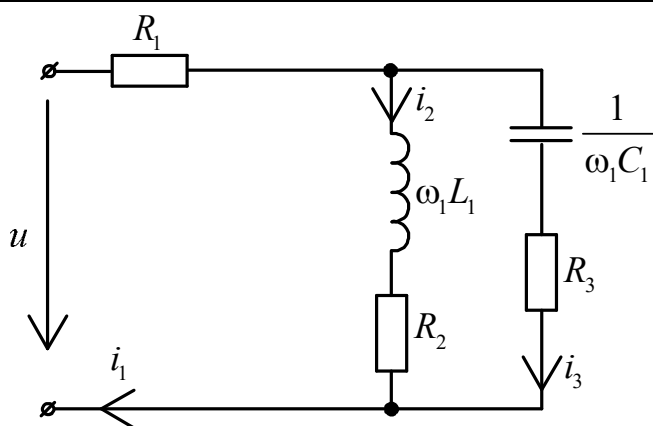


Рисунок 1

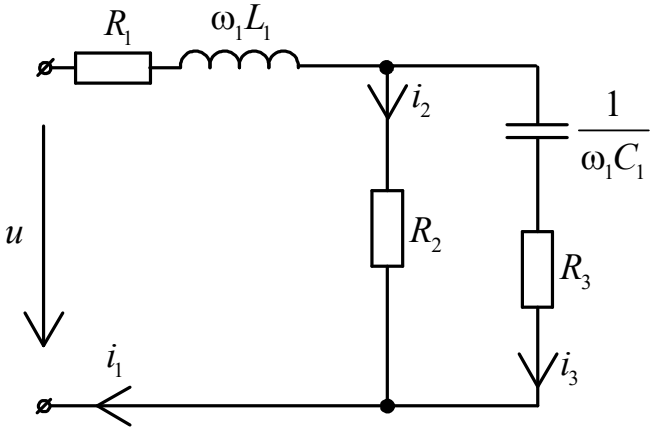
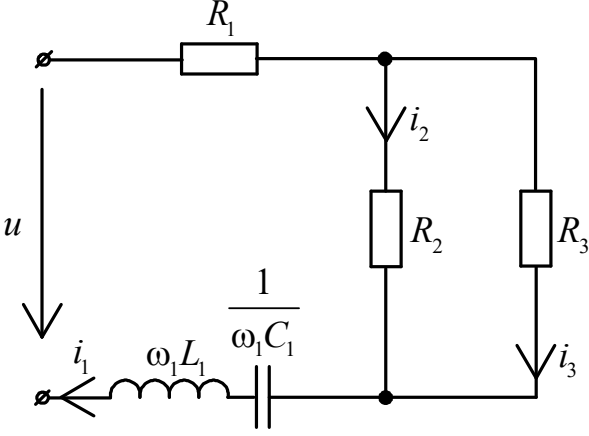
Варіант №29

Завдання:

1. Розрахувати діюче та миттєві струмів, якщо напруга живлення
 $u = 300 \sin(\omega_{(1)}t + 90^\circ) + 200 \sin(5\omega_{(1)}t - 30^\circ)$ (В).

2. Визначити потужність спотворення T та коефіцієнт потужності λ .

$R_1, \text{ Ом}$	6
$R_2, \text{ Ом}$	8
$R_3, \text{ Ом}$	10
$\omega_1 L_1, \text{ Ом}$	12
$1/(\omega_1 C_1), \text{ Ом}$	20

 <p style="text-align: center;">Рисунок 1</p>	Ом										
<p>Варіант №30</p> <p>Завдання:</p> <p>1. Розрахувати діюче та миттєві струмів, якщо напруга живлення</p> $u = 100 + 300 \sin(\omega_{(1)}t + 90^\circ) + 200 \sin(5\omega_{(1)}t - 30^\circ) \text{ (В)}.$ <p>2. Визначити потужність спотворення T та коефіцієнт потужності λ.</p>											
 <p style="text-align: center;">Рисунок 1</p>	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tbody> <tr> <td style="padding: 2px;">R_1, Ом</td> <td style="text-align: right; padding: 2px;">6</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">R_2, Ом</td> <td style="text-align: right; padding: 2px;">8</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">R_3, Ом</td> <td style="text-align: right; padding: 2px;">10</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">$\omega_1 L_1$, Ом</td> <td style="text-align: right; padding: 2px;">12</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">$1/(\omega_1 C_1)$, Ом</td> <td style="text-align: right; padding: 2px;">20</td> </tr> </tbody> </table>	R_1 , Ом	6	R_2 , Ом	8	R_3 , Ом	10	$\omega_1 L_1$, Ом	12	$1/(\omega_1 C_1)$, Ом	20
R_1 , Ом	6										
R_2 , Ом	8										
R_3 , Ом	10										
$\omega_1 L_1$, Ом	12										
$1/(\omega_1 C_1)$, Ом	20										

Задача №3.П.2

Визначити покази приладів трифазного кола (рис. 3.3.П.2.1). ЕРС фази A генератора

$$e_A(t) = 220\sqrt{2} \sin(\omega_{(1)}t + 60^\circ) + 100\sqrt{2} \sin(3\omega_{(1)}t + 120^\circ) + 60\sqrt{2} \sin(5\omega_{(1)}t - 30^\circ) \text{ (В)}.$$

Параметри навантаження: значення A залежить від шифру групи. Або видає викладач

$$A = \begin{cases} 10, & \text{для ЕД-;} \\ 20, & \text{для ЕВ-; } N=\text{номер у списку.} \\ 30, & \text{для ЕТ-;} \end{cases}$$

$R_1 = A + N + 1$ (Ом), $X_{C1} = A + N + 2$ (Ом) – для першої гармоніки.

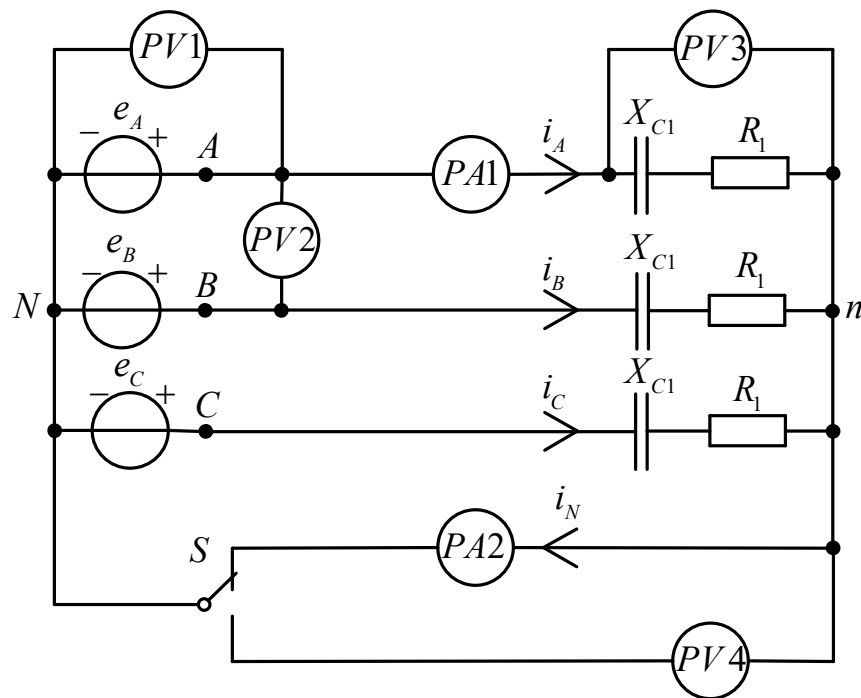


Рисунок 3.П.2.1 – Схема трифазного кола

Практичне заняття №4 Визначення коефіцієнтів рівнянь 4-полюсника різних форм запису

Визначення \underline{Y} - та \underline{Z} - параметрів 4-полюсника. Визначення \underline{A} - параметрів із режимів неробочого ходу та короткого замикання. Вторинні параметри чотириполюсника.

Задача 1

У колі, що зображено на рис. 4.1.1, напруга живлення $\underline{U}_1 = 140 \angle -45^\circ (\text{В})$.

Визначити первинні та вторинні параметри чотириполюсника, якщо $X_{L1} = 10(\text{Ом})$, $X_{L2} = 40(\text{Ом})$, $X_{L3} = 100(\text{Ом})$, $X_{C1} = 15(\text{Ом})$, $X_{C2} = 25(\text{Ом})$, $R_1 = 10(\text{Ом})$, $R_2 = 20(\text{Ом})$ та $R_3 = 5(\text{Ом})$.

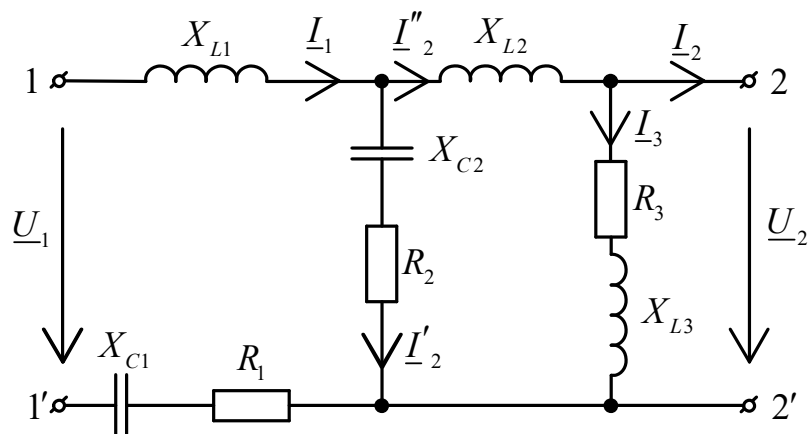


Рисунок 4.1.1 – Електрична схема у режимі неробочого ходу

Знайти первинні коефіцієнти матриці для чотириполюсника з дослідів *неробочого ходу та короткого замикання* та впевнитися що коефіцієнти задовольняють рівнянню зв'язку.

На рис. 4.1.1 чотириполюсник знаходиться у **режимі неробочого ходу** $\underline{I}_{2\text{нк}} = 0$. Визначимо значення вхідного комплексного опору відносно полюсів 1-1'

$$\begin{aligned}
\underline{Z}_{\text{BX1}' } &= R_1 + jX_{L1} - jX_{C1} + \frac{(R_3 + jX_{L2} + jX_{L3})(R_2 - jX_{C2})}{(R_3 + jX_{L2} + jX_{L3}) + (R_2 - jX_{C2})} = \\
&= 10 + j10 - j15 + \frac{(5 + j40 + j100)(20 - j25)}{(5 + j40 + j100) + (20 - j25)} = \\
&= 38.709 - j30.063 = 49.012 \angle -37.834^\circ (\text{Ом}).
\end{aligned}
\tag{4.1.1}$$

Розрахуємо значення струмів у вітках

$$\begin{aligned}
\underline{I}_{\text{IHX}} &= \frac{\underline{U}_1}{\underline{Z}_{\text{BX1}' }} = \frac{145 \angle -45^\circ}{49.012 \angle -37.834^\circ} = \\
&= 2.834 - j0.356 = 2.856 \angle -7.166^\circ (\text{А}).
\end{aligned}
\tag{4.1.2}$$

За правом «чужого плеча» знайдемо струм $\underline{I}'_{2\text{HX}}$

$$\begin{aligned}
\underline{I}'_{2\text{HX}} &= \underline{I}_{\text{IHX}} \frac{(R_3 + jX_{L2} + jX_{L3})}{(R_3 + jX_{L2} + jX_{L3}) + (R_2 - jX_{C2})} = \\
&= 2.856 \angle -7.166^\circ \frac{(5 + j40 + j100)}{(5 + j40 + j100) + (20 - j25)} = 3.395 + j0.181 = \\
&= 3.4 \angle 3.054^\circ (\text{А}).
\end{aligned}
\tag{4.1.3}$$

За першим законом Кірхгофа визначимо струм $\underline{I}''_{2\text{HX}}$

$$\begin{aligned}
\underline{I}''_{2\text{HX}} &= \underline{I}_{\text{IHX}} - \underline{I}'_{2\text{HX}} = 2.856 \angle -7.166^\circ - 3.4 \angle 3.054^\circ = \\
&= 0.777 \angle -136.241^\circ (\text{А}).
\end{aligned}
\tag{4.1.4}$$

Напряга на виході чотириполюсника дорівнює

$$\begin{aligned}
\underline{U}_{2\text{HX}} &= \underline{I}_{\text{IHX}} (R_3 + jX_{L3}) = 0.777 \angle -136.241^\circ (5 + j100) = \\
&= 50.938 - j58.812 = 77.804 \angle -49.104^\circ (\text{В}).
\end{aligned}
\tag{4.1.5}$$

Запишемо основні рівняння чотириполюсника через коефіцієнти матриці $\|A\|$ для прямого живлення

$$\begin{aligned}\underline{U}_1 &= \underline{A} \cdot \underline{U}_2 + \underline{B} \cdot \underline{I}_2; \\ \underline{I}_1 &= \underline{C} \cdot \underline{U}_2 + \underline{D} \cdot \underline{I}_2.\end{aligned}\tag{4.1.6}$$

З дослідів неробочого ходу ($\underline{I}_{2\text{HX}} = 0$) визначимо коефіцієнти \underline{A} , \underline{C}

$$\begin{aligned}\underline{A} &= \frac{\underline{U}_1}{\underline{U}_{2\text{HX}}} = \frac{145 \angle -45^\circ}{77.804 \angle -49.104^\circ} = 1.799 \angle 4.104^\circ; \\ \underline{C} &= \frac{\underline{I}_{1\text{HX}}}{\underline{U}_{2\text{HX}}} = \frac{2.856 \angle -7.166^\circ}{77.804 \angle -49.104^\circ} = 0.037 \angle 41.938^\circ (\text{См}).\end{aligned}\tag{4.1.7}$$

Режим короткого замикання чотирьох полюсів $\underline{U}_{2\text{КЗ}} = 0$ наведено на рис. 4.1.2.

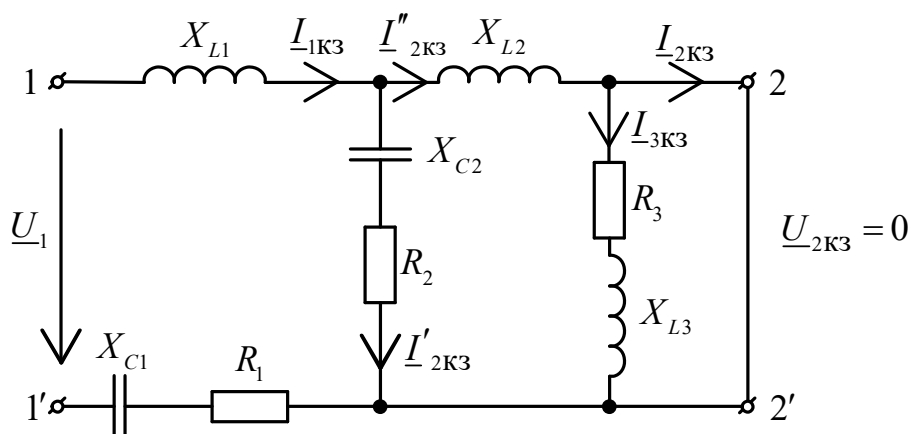


Рисунок 4.1.2 – Електрична схема чотирьох полюсів в режимі короткого замикання

Визначимо вхідний комплексний опір відносно полюсів 1-1'

$$\begin{aligned}\underline{Z}_{\text{BX}11'} &= R_1 + jX_{L1} - jX_{C1} + \frac{(jX_{L2})(R_2 - jX_{C2})}{(jX_{L2}) + (R_2 - jX_{C2})} = \\ &= 10 + j10 - j15 + \frac{(j40)(20 - j25)}{(j40) + (20 - j25)} = \\ &= 61.2 - j3.4 = 61.294 \angle -3.18^\circ (\text{Ом}).\end{aligned}\tag{4.1.8}$$

Розрахуємо значення струмів у вітках електричного кола

$$\begin{aligned} \underline{I}_{1КЗ} &= \frac{\underline{U}_1}{\underline{Z}_{ВХ11'}} = \frac{145 \angle -45^\circ}{61.294 \angle -3.18^\circ} = 1.702 - j1.523 = \\ &= 2.284 \angle -41.82^\circ (\text{А}). \end{aligned} \quad (4.1.9)$$

За правом «чужого плеча» знайдемо значення комплексу струму $\underline{I}'_{2КЗ}$

$$\begin{aligned} \underline{I}'_{2КЗ} &= \underline{I}_{1КЗ} \frac{(jX_{L2})}{(jX_{L2}) + (R_2 - jX_{C2})} = \\ &= 2.284 \angle -41.82^\circ \frac{(j40)}{(j40) + (20 - j25)} = \\ &= 3.584 + j0.717 = 3.654 \angle 11.31^\circ (\text{А}). \end{aligned} \quad (4.1.10)$$

За першим законом Кірхгофа визначимо струм $\underline{I}''_{2КЗ}$

$$\begin{aligned} \underline{I}''_{2КЗ} &= \underline{I}_{2КЗ} = \underline{I}_{1КЗ} - \underline{I}'_{2КЗ} = 2.284 \angle -41.82^\circ - 3.654 \angle 11.31^\circ = \\ &= 2.925 \angle -130.03^\circ (\text{А}); \\ \underline{I}_{3КЗ} &= 0. \end{aligned} \quad (4.1.11)$$

З досліду короткого замикання $\underline{U}_{2КЗ} = 0$ визначимо коефіцієнти \underline{B} , \underline{D}

$$\begin{aligned} \underline{B} &= \frac{\underline{U}_1}{\underline{I}_{2КЗ}} = \frac{145 \angle -45^\circ}{2.925 \angle -130.03^\circ} = 47.863 \angle 85.03^\circ (\text{Ом}); \\ \underline{D} &= \frac{\underline{I}_{1КЗ}}{\underline{I}_{2КЗ}} = \frac{2.284 \angle -41.82^\circ}{2.925 \angle -130.03^\circ} = 0.781 \angle 88.21^\circ. \end{aligned} \quad (4.1.12)$$

Достовірність розрахунків перевіряємо за рівнянням зв'язку

$$\begin{aligned} \underline{A} \cdot \underline{D} - \underline{B} \cdot \underline{C} &= \\ &= 1.799 \angle 4.104^\circ \cdot 0.781 \angle 88.21^\circ - \dots \\ &\dots - 47.863 \angle 85.03^\circ \cdot 0.037 \angle 41.938^\circ = 1. \end{aligned} \quad (4.1.13)$$

Визначимо ЕРС та струм на вході чотириполюсника (рис 4.1.3), якщо до нього підключимо навантаження \underline{Z}_2 .

Вихідна напруга $\underline{U}_2 = 100 \angle 30^\circ$ (В), а струм навантаження $\underline{I}_2 = 1$ (А).

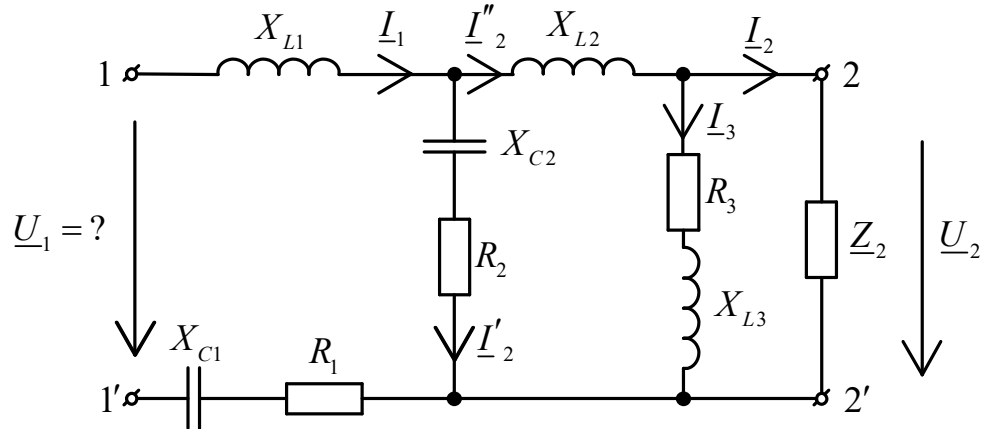


Рисунок 4.1.3 – Електрична схема під час навантаження

Запишемо основні рівняння чотириполюсника через коефіцієнти матриці $\|A\|$ для прямого живлення

$$\begin{aligned} \underline{U}_1 &= \underline{A} \cdot 100 \angle 30^\circ + \underline{B} \cdot 1 = 213.368 \angle 44.133^\circ \text{ (В)}; \\ \underline{I}_1 &= \underline{C} \cdot 100 \angle 30^\circ + \underline{D} \cdot 1 = 4.426 \angle 74.771^\circ \text{ (А)}. \end{aligned} \quad (4.1.14)$$

Розрахуємо комплексний опір навантаження

$$\underline{Z}_2 = \frac{\underline{U}_2}{\underline{I}_2} = \frac{100 \angle -30^\circ}{1} = 86.603 - j50 = 100 \angle -30^\circ \text{ (Ом)}. \quad (4.1.15)$$

Розрахуємо параметри R , L , C елементів чотириполюсника для П схеми заміщення (рис. 4.1.4).

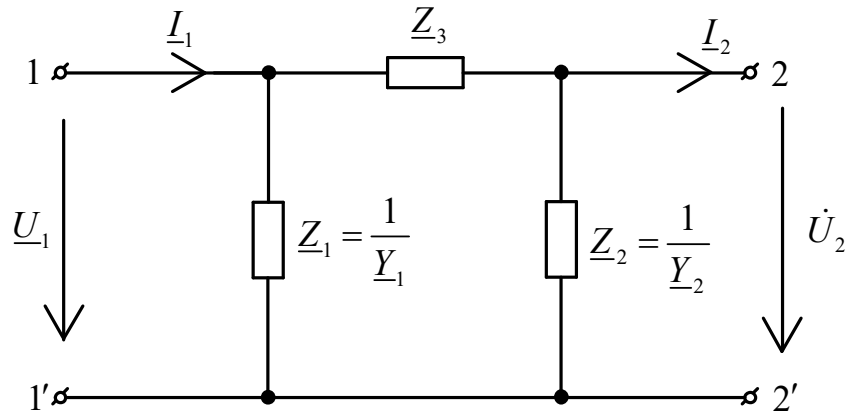


Рисунок 4.1.4 – П- подібна схема заміщення чотиріполюсника

$$\begin{aligned}
 \underline{Z}_1 &= \frac{\underline{B}}{\underline{D}-1} = \frac{47.863 \angle 85.03^\circ}{0.781 \angle 88.21^\circ - 1} = \\
 &= 21.25 - j31.875 = 38.309 \angle -56.31^\circ (\text{Ом}); \\
 \underline{Z}_2 &= \frac{\underline{B}}{\underline{A}-1} = \frac{47.863 \angle 85.03^\circ}{1.799 \angle 4.104^\circ - 1} = 14.555 + j57.637 = \\
 &= 59.446 \angle 75.828^\circ (\text{Ом}); \\
 \underline{Z}_3 &= \underline{B} = 47.863 \angle 85.03^\circ = 4.146 + j47.683 (\text{Ом}).
 \end{aligned}
 \tag{4.1.16}$$

Для визначення параметрів Т- подібного чотиріполюсника (рис. 4.1.5) потрібно врахувати рівняння зв'язку.

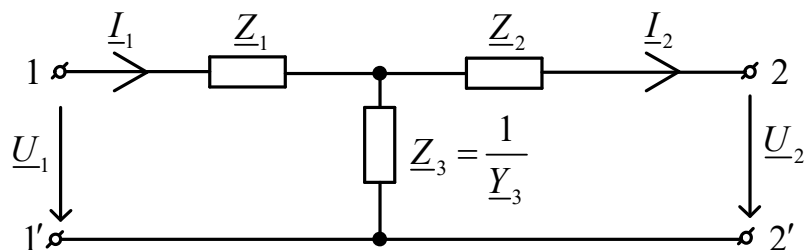


Рисунок 4.1.5 – Т- подібна схема заміщення чотиріполюсника

$$\begin{aligned}
\underline{Z}_1 &= \frac{\underline{A}-1}{\underline{C}} = \frac{1.799 \angle 4.104^\circ - 1}{0.037 \angle 41.938^\circ} = 18.448 - j11.859 = \\
&= 21.931 \angle -32.735^\circ (\text{Ом}); \\
\underline{Z}_2 &= \frac{\underline{D}-1}{\underline{C}} = \frac{0.781 \angle 88.21^\circ - 1}{0.037 \angle 41.938^\circ} = -5.56 + 33.574 = \\
&= 34.031 \angle 99.402^\circ (\text{Ом}); \\
\underline{Z}_3 &= \frac{1}{\underline{C}} = \frac{1}{0.037 \angle 41.938^\circ} = 20.262 - j18.204 = \\
&= 27.238 \angle -41.938^\circ (\text{Ом}).
\end{aligned} \tag{4.1.17}$$

Активна складова \underline{Z}_2 є **від'ємною**, то *чотириполюсник неможна замінити пасивною Т-подібною схемою заміщення.*

Розрахунок вторинних параметрів чотириполюсника

Характеристичний опір з боку вхідних затискачів 1-1'

$$\begin{aligned}
\underline{Z}_{c1} &= \sqrt{\frac{\underline{A} \cdot \underline{B}}{\underline{C} \cdot \underline{D}}} = \sqrt{\frac{(1.799 \angle 4.104^\circ) \cdot (47.863 \angle 85.03^\circ)}{(0.037 \angle 41.938^\circ) \cdot (0.781 \angle 88.21^\circ)}} = \\
&= 51.337 - j19.201 = 54.81 \angle -20.507^\circ (\text{Ом}).
\end{aligned} \tag{4.1.18}$$

Характеристичний опір з боку вихідних затискачів 2-2'

$$\begin{aligned}
\underline{Z}_{c2} &= \sqrt{\frac{\underline{D} \cdot \underline{B}}{\underline{C} \cdot \underline{A}}} = \sqrt{\frac{(0.781 \angle 88.21^\circ) \cdot (47.863 \angle 85.03^\circ)}{(0.037 \angle 41.938^\circ) \cdot (1.799 \angle 4.104^\circ)}} = \\
&= 10.576 + j21.305 = 23.786 \angle 63.599^\circ (\text{Ом}).
\end{aligned} \tag{4.1.19}$$

Коефіцієнт поширення (передачі) чотириполюсника

$$\begin{aligned} \gamma &= \ln(\sqrt{A \cdot D} + \sqrt{B \cdot C}) = \ln(\sqrt{1.799 \angle 4.104^\circ \cdot 0.781 \angle 88.21^\circ} + \\ &+ \sqrt{47.863 \angle 85.03^\circ \cdot 0.037 \angle 41.938^\circ}) = 1.954 + j21.305; \\ \alpha &= 1.954 \text{ Нп} - \text{коефіцієнт згасання}; \\ \beta &= 21.305 - \text{коефіцієнт фази}. \end{aligned} \quad (4.1.20)$$

В узгодженому режимі чотириполюсника за вторинними параметрами визначити напругу \underline{U}_2 та струм \underline{I}_2 , якщо напруга на вході $\underline{U}_1 = 140 \angle -45^\circ$ (В).

$$\begin{aligned} \underline{U}_2 &= \underline{U}_1 \sqrt{\frac{\underline{Z}_{C2}}{\underline{Z}_{C1}}} \cdot e^{-\gamma} = 140 \angle -45^\circ \sqrt{\frac{23.786 \angle 63.599^\circ}{54.81 \angle -20.507^\circ}} \cdot e^{-(1.954 + j21.305)} = \\ &= -1.523 - j12.979 = 13.068 \angle -83.309^\circ \text{ (В)}; \\ \underline{I}_2 &= \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_{C2}} = \frac{13.068 \angle -83.309^\circ}{23.786 \angle 63.599^\circ} = -0.46 - j0.3 = \\ &= 0.549 \angle -146.909^\circ \text{ (А)}. \end{aligned} \quad (4.1.21)$$

Під час узгодженого навантаження вхідний опір чотириполюсника дорівнює характеристичному

$$\begin{aligned} \underline{I}_1 &= \frac{\underline{U}_1}{\underline{Z}_{C1}} = \frac{140 \angle -45^\circ}{54.81 \angle -20.507^\circ} = \\ &= 2.324 - j1.059 = 2.554 \angle -24.493^\circ \text{ (А)}; \\ \underline{I}_2 &= \underline{I}_1 \sqrt{\frac{\underline{Z}_{C1}}{\underline{Z}_{C2}}} \cdot e^{-\gamma} = \\ &= 2.554 \angle -24.493^\circ \sqrt{\frac{54.81 \angle -20.507^\circ}{23.786 \angle 63.599^\circ}} \cdot e^{-(1.954 + j21.305)} = \\ &= -0.46 - j0.3 = 0.549 \angle -146.909^\circ \text{ (А)}. \end{aligned} \quad (4.1.22)$$

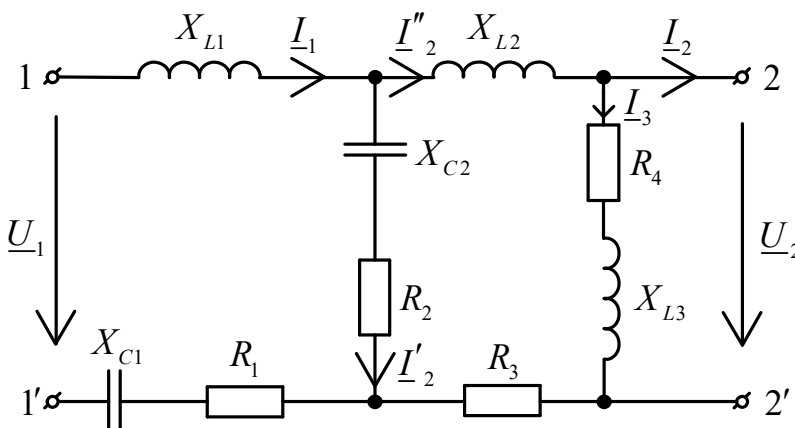
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Бурик М.П. Лінійні електричні кола однофазного синусоїдного струму: Розрахунково–графічна робота [Електронний ресурс] : навч. посіб.

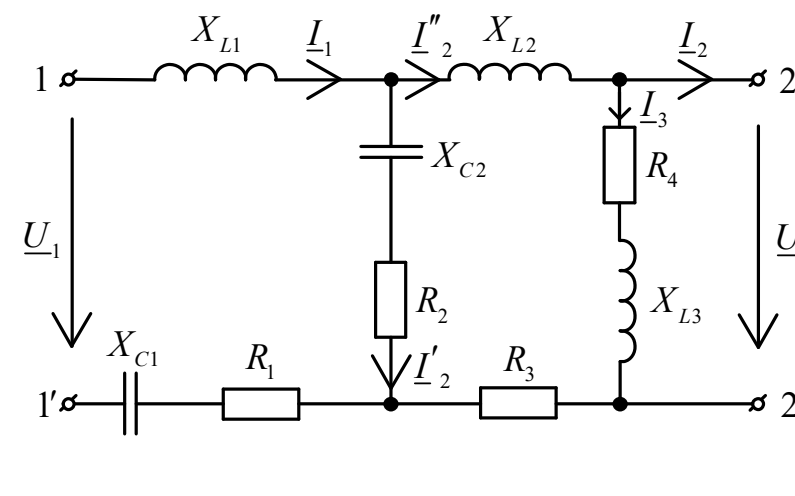
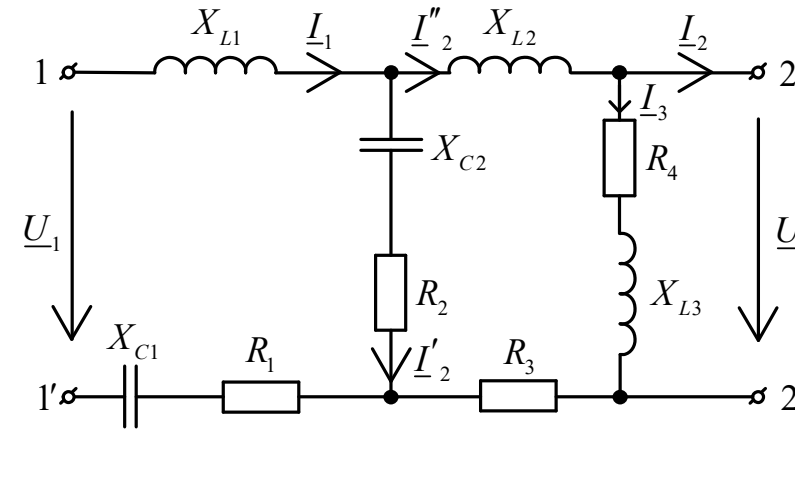
для здобувачів ступеня бакалавра за освітніми програмами «Електротехнічні пристрої та електротехнологічні комплекси», «Нетрадиційні та відновлювальні джерела енергії», «Електричні станції», «Електромеханічні системи автоматизації, електропривод та електромобільність» та «Електричні машини і апарати» спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / М. П. Бурик, Л. Ю. Спінул, В. Ю. Лободзинський; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 18,8 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 148 с.

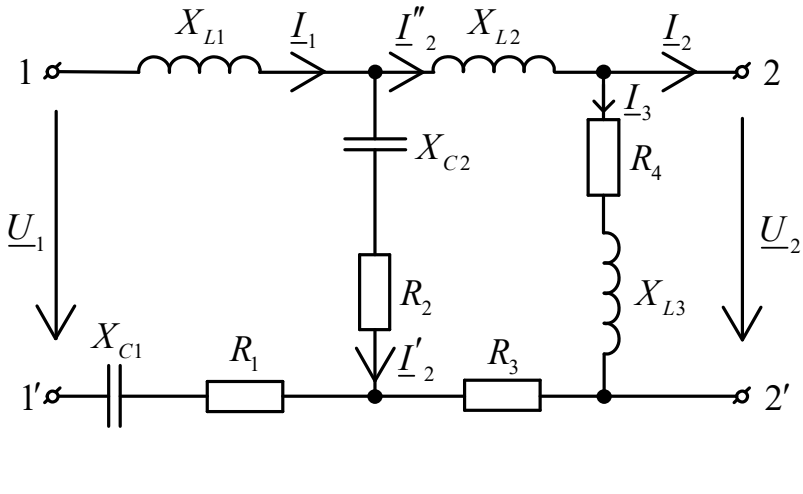
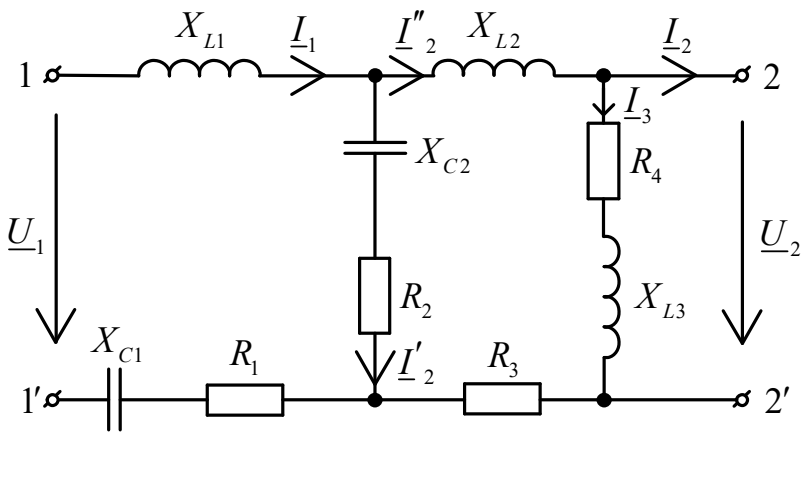
Завдання для самостійного розрахунку коефіцієнтів рівнянь 4-полюсника

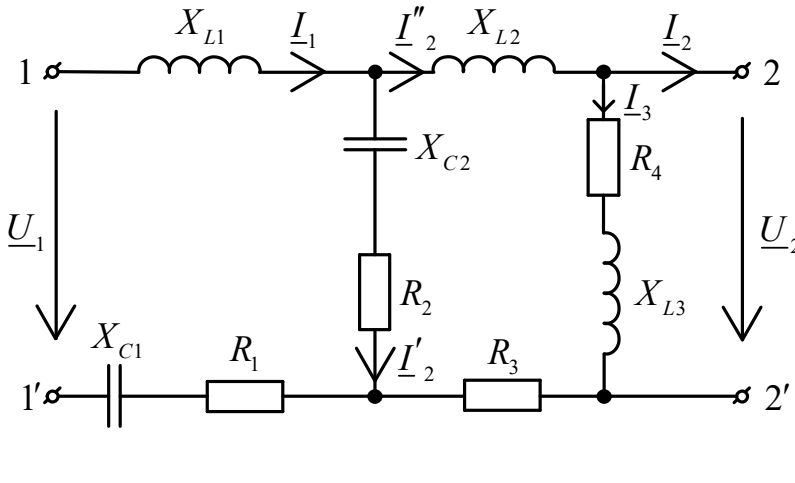
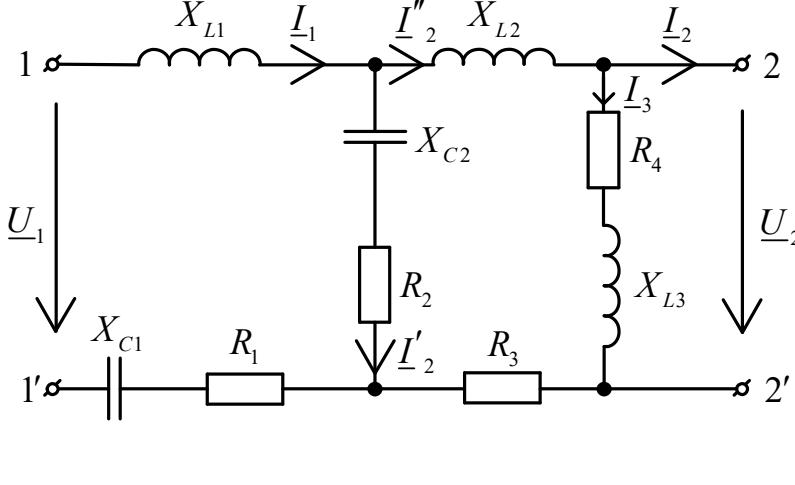
(варіанти вибрати згідно списку групи)

Варіант №1		$\underline{E}, \text{В}$	$100 \angle 10^\circ$
Завдання: 1. Знайти комплексні опори П- подібної схеми заміщення.		$R_1, \text{Ом}$	10
		$R_2, \text{Ом}$	20
		$R_3, \text{Ом}$	30
		$R_4, \text{Ом}$	30
Рисунок 1		$X_{L1}, \text{Ом}$	10
		$X_{L2}, \text{Ом}$	20
Варіант №2		$X_{L3}, \text{Ом}$	30
		$X_{C1}, \text{Ом}$	5
Завдання:		$X_{C2}, \text{Ом}$	10
		$\underline{E}, \text{В}$	$110 \angle 20^\circ$

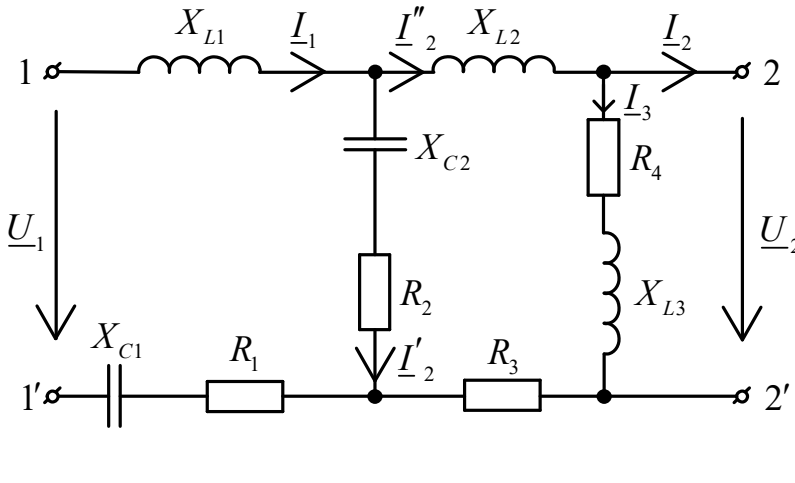
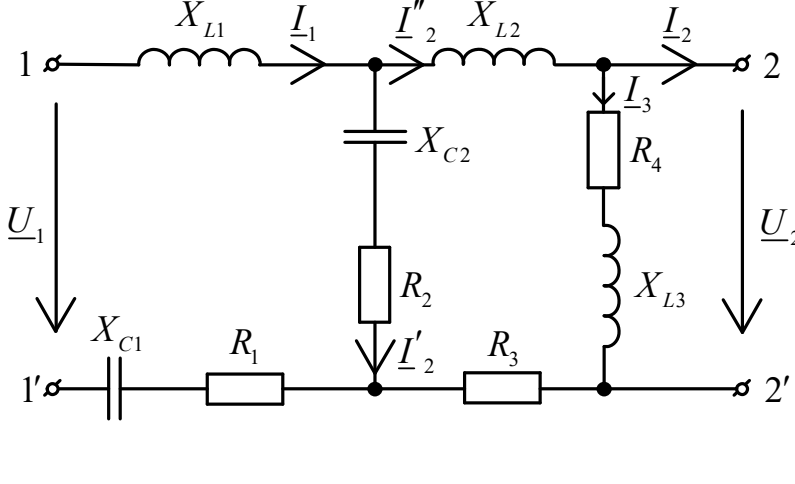
<p>1. Знайти комплексні опори Т- подібної схеми заміщення.</p>	<p>$R_1, \text{ Ом}$ 10</p> <p>$R_2, \text{ Ом}$ 20</p>
<div style="text-align: center;"> <p>Рисунок 1</p> </div>	<p>$R_3, \text{ Ом}$ 30</p> <p>$R_4, \text{ Ом}$ 30</p> <p>$X_{L1}, \text{ Ом}$ 10</p> <p>$X_{L2}, \text{ Ом}$ 20</p> <p>$X_{L3}, \text{ Ом}$ 30</p> <p>$X_{C1}, \text{ Ом}$ 5</p> <p>$X_{C2}, \text{ Ом}$ 10</p>
<p style="text-align: center;">Варіант №3</p> <p>Завдання:</p> <p>1. Знайти комплексні опори П- подібної схеми заміщення.</p>	<p>$\underline{E}, \text{ В}$ $120 \angle 30^\circ$</p> <p>$R_1, \text{ Ом}$ 0</p> <p>$R_2, \text{ Ом}$ 20</p> <p>$R_3, \text{ Ом}$ 30</p>
<div style="text-align: center;"> <p>Рисунок 1</p> </div>	<p>$R_4, \text{ Ом}$ 30</p> <p>$X_{L1}, \text{ Ом}$ 10</p> <p>$X_{L2}, \text{ Ом}$ 20</p> <p>$X_{L3}, \text{ Ом}$ 30</p> <p>$X_{C1}, \text{ Ом}$ 5</p> <p>$X_{C2}, \text{ Ом}$ 10</p>
<p style="text-align: center;">Варіант №4</p> <p>Завдання:</p> <p>1. Знайти комплексні опори Т- подібної схеми</p>	<p>$\underline{E}, \text{ В}$ $130 \angle 40^\circ$</p> <p>$R_1, \text{ Ом}$ 10</p>

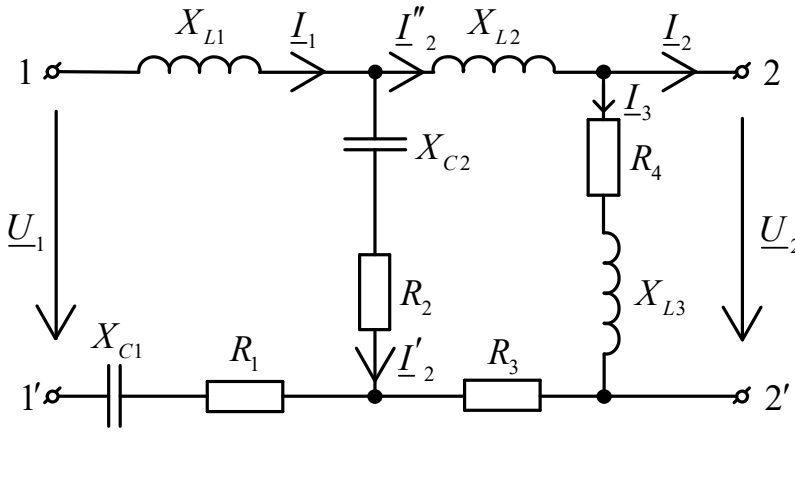
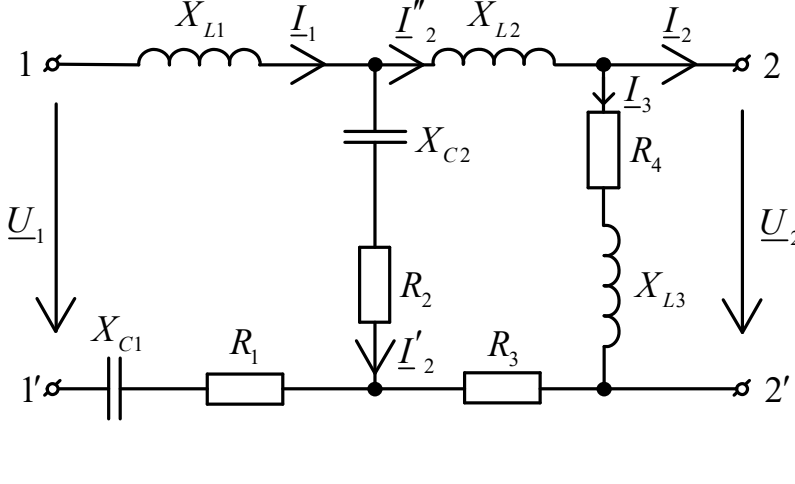
заміщення.	$R_2, \text{ Ом}$ 0 $R_3, \text{ Ом}$ 30
 <p style="text-align: center;">Рисунок 1</p>	$R_4, \text{ Ом}$ 30 $X_{L1}, \text{ Ом}$ 10 $X_{L2}, \text{ Ом}$ 20 $X_{L3}, \text{ Ом}$ 30 $X_{C1}, \text{ Ом}$ 5 $X_{C2}, \text{ Ом}$ 10
<p style="text-align: center;">Варіант №5</p> <p>Завдання:</p> <p>1. Знайти комплексні опори П- подібної схеми заміщення.</p>	$\underline{E}, \text{ В}$ $140 \angle 50^\circ$ $R_1, \text{ Ом}$ 10 $R_2, \text{ Ом}$ 20 $R_3, \text{ Ом}$ 0
 <p style="text-align: center;">Рисунок 1</p>	$R_4, \text{ Ом}$ 30 $X_{L1}, \text{ Ом}$ 0 $X_{L2}, \text{ Ом}$ 20 $X_{L3}, \text{ Ом}$ 30 $X_{C1}, \text{ Ом}$ 5 $X_{C2}, \text{ Ом}$ 10
<p style="text-align: center;">Варіант №6</p> <p>Завдання:</p> <p>1. Знайти комплексні опори Т- подібної схеми заміщення.</p>	$\underline{E}, \text{ В}$ $150 \angle 60^\circ$ $R_1, \text{ Ом}$ 10 $R_2, \text{ Ом}$ 20

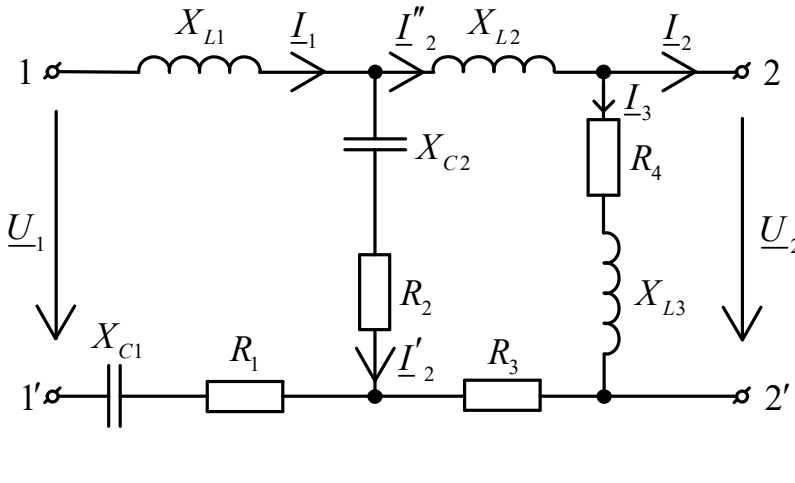
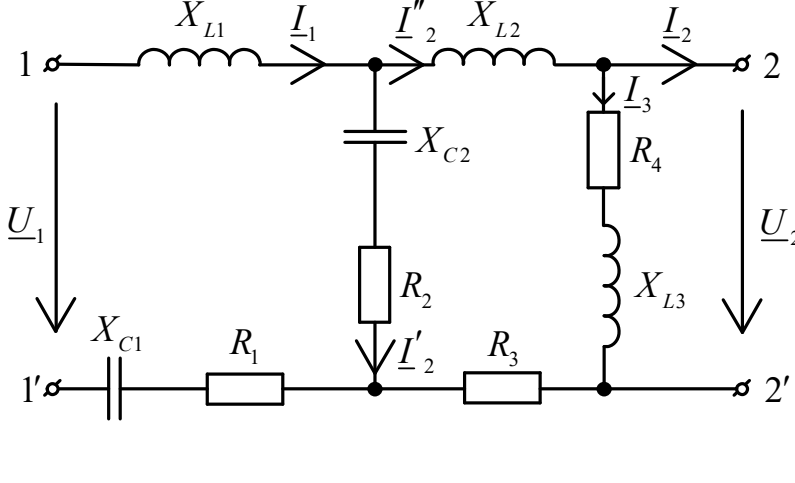
 <p style="text-align: center;">Рисунок 1</p>	<table border="0"> <tr><td>$R_3, \text{ Ом}$</td><td>30</td></tr> <tr><td>$R_4, \text{ Ом}$</td><td>30</td></tr> <tr><td>$X_{L1}, \text{ Ом}$</td><td>10</td></tr> <tr><td>$X_{L2}, \text{ Ом}$</td><td>20</td></tr> <tr><td>$X_{L3}, \text{ Ом}$</td><td>30</td></tr> <tr><td>$X_{C1}, \text{ Ом}$</td><td>5</td></tr> <tr><td>$X_{C2}, \text{ Ом}$</td><td>0</td></tr> </table>	$R_3, \text{ Ом}$	30	$R_4, \text{ Ом}$	30	$X_{L1}, \text{ Ом}$	10	$X_{L2}, \text{ Ом}$	20	$X_{L3}, \text{ Ом}$	30	$X_{C1}, \text{ Ом}$	5	$X_{C2}, \text{ Ом}$	0						
$R_3, \text{ Ом}$	30																				
$R_4, \text{ Ом}$	30																				
$X_{L1}, \text{ Ом}$	10																				
$X_{L2}, \text{ Ом}$	20																				
$X_{L3}, \text{ Ом}$	30																				
$X_{C1}, \text{ Ом}$	5																				
$X_{C2}, \text{ Ом}$	0																				
<p style="text-align: center;">Варіант №7</p> <p>Завдання:</p> <p>1. Знайти комплексні опори П- подібної схеми заміщення.</p>	<table border="0"> <tr><td>$\underline{E}, \text{ В}$</td><td>$160 \angle 70^\circ$</td></tr> <tr><td>$R_1, \text{ Ом}$</td><td>10</td></tr> <tr><td>$R_2, \text{ Ом}$</td><td>20</td></tr> <tr><td>$R_3, \text{ Ом}$</td><td>30</td></tr> <tr><td>$R_4, \text{ Ом}$</td><td>30</td></tr> <tr><td>$X_{L1}, \text{ Ом}$</td><td>10</td></tr> <tr><td>$X_{L2}, \text{ Ом}$</td><td>20</td></tr> <tr><td>$X_{L3}, \text{ Ом}$</td><td>30</td></tr> <tr><td>$X_{C1}, \text{ Ом}$</td><td>0</td></tr> <tr><td>$X_{C2}, \text{ Ом}$</td><td>10</td></tr> </table>	$\underline{E}, \text{ В}$	$160 \angle 70^\circ$	$R_1, \text{ Ом}$	10	$R_2, \text{ Ом}$	20	$R_3, \text{ Ом}$	30	$R_4, \text{ Ом}$	30	$X_{L1}, \text{ Ом}$	10	$X_{L2}, \text{ Ом}$	20	$X_{L3}, \text{ Ом}$	30	$X_{C1}, \text{ Ом}$	0	$X_{C2}, \text{ Ом}$	10
$\underline{E}, \text{ В}$	$160 \angle 70^\circ$																				
$R_1, \text{ Ом}$	10																				
$R_2, \text{ Ом}$	20																				
$R_3, \text{ Ом}$	30																				
$R_4, \text{ Ом}$	30																				
$X_{L1}, \text{ Ом}$	10																				
$X_{L2}, \text{ Ом}$	20																				
$X_{L3}, \text{ Ом}$	30																				
$X_{C1}, \text{ Ом}$	0																				
$X_{C2}, \text{ Ом}$	10																				
 <p style="text-align: center;">Рисунок 1</p>	<table border="0"> <tr><td>$\underline{E}, \text{ В}$</td><td>$170 \angle 80^\circ$</td></tr> <tr><td>$R_1, \text{ Ом}$</td><td>0</td></tr> <tr><td>$R_2, \text{ Ом}$</td><td>20</td></tr> </table>	$\underline{E}, \text{ В}$	$170 \angle 80^\circ$	$R_1, \text{ Ом}$	0	$R_2, \text{ Ом}$	20														
$\underline{E}, \text{ В}$	$170 \angle 80^\circ$																				
$R_1, \text{ Ом}$	0																				
$R_2, \text{ Ом}$	20																				
<p style="text-align: center;">Варіант №8</p> <p>Завдання:</p> <p>1. Знайти комплексні опори Т- подібної схеми заміщення.</p>	<table border="0"> <tr><td>$\underline{E}, \text{ В}$</td><td>$170 \angle 80^\circ$</td></tr> <tr><td>$R_1, \text{ Ом}$</td><td>0</td></tr> <tr><td>$R_2, \text{ Ом}$</td><td>20</td></tr> </table>	$\underline{E}, \text{ В}$	$170 \angle 80^\circ$	$R_1, \text{ Ом}$	0	$R_2, \text{ Ом}$	20														
$\underline{E}, \text{ В}$	$170 \angle 80^\circ$																				
$R_1, \text{ Ом}$	0																				
$R_2, \text{ Ом}$	20																				

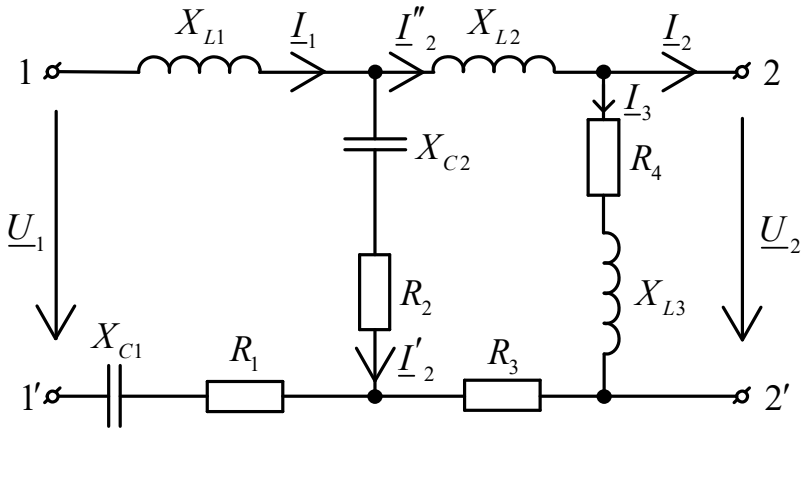
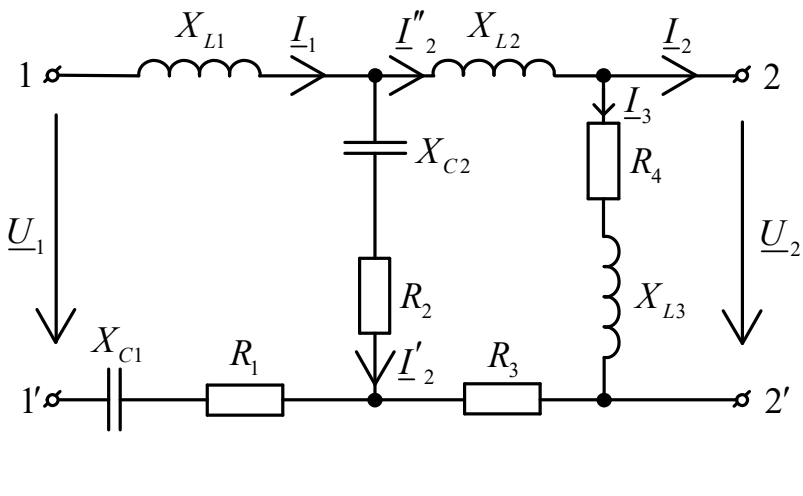
 <p style="text-align: center;">Рисунок 1</p>	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="width: 50%;">$R_3, \text{ Ом}$</td><td style="width: 50%; text-align: right;">30</td></tr> <tr><td>$R_4, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">30</td></tr> <tr><td>$X_{L1}, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">10</td></tr> <tr><td>$X_{L2}, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">20</td></tr> <tr><td>$X_{L3}, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">30</td></tr> <tr><td>$X_{C1}, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">0</td></tr> <tr><td>$X_{C2}, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">10</td></tr> </table>	$R_3, \text{ Ом}$	30	$R_4, \text{ Ом}$	30	$X_{L1}, \text{ Ом}$	10	$X_{L2}, \text{ Ом}$	20	$X_{L3}, \text{ Ом}$	30	$X_{C1}, \text{ Ом}$	0	$X_{C2}, \text{ Ом}$	10						
$R_3, \text{ Ом}$	30																				
$R_4, \text{ Ом}$	30																				
$X_{L1}, \text{ Ом}$	10																				
$X_{L2}, \text{ Ом}$	20																				
$X_{L3}, \text{ Ом}$	30																				
$X_{C1}, \text{ Ом}$	0																				
$X_{C2}, \text{ Ом}$	10																				
<p style="text-align: center;">Варіант №9</p> <p>Завдання:</p> <p>1. Знайти комплексні опори П- подібної схеми заміщення.</p>	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="width: 50%;">$\underline{E}, \text{ В}$</td><td style="width: 50%; text-align: right;">$180 \angle 90^\circ$</td></tr> <tr><td>$R_1, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">10</td></tr> <tr><td>$R_2, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">20</td></tr> <tr><td>$R_3, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">30</td></tr> <tr><td>$R_4, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">30</td></tr> <tr><td>$X_{L1}, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">0</td></tr> <tr><td>$X_{L2}, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">0</td></tr> <tr><td>$X_{L3}, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">30</td></tr> <tr><td>$X_{C1}, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">5</td></tr> <tr><td>$X_{C2}, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">10</td></tr> </table>	$\underline{E}, \text{ В}$	$180 \angle 90^\circ$	$R_1, \text{ Ом}$	10	$R_2, \text{ Ом}$	20	$R_3, \text{ Ом}$	30	$R_4, \text{ Ом}$	30	$X_{L1}, \text{ Ом}$	0	$X_{L2}, \text{ Ом}$	0	$X_{L3}, \text{ Ом}$	30	$X_{C1}, \text{ Ом}$	5	$X_{C2}, \text{ Ом}$	10
$\underline{E}, \text{ В}$	$180 \angle 90^\circ$																				
$R_1, \text{ Ом}$	10																				
$R_2, \text{ Ом}$	20																				
$R_3, \text{ Ом}$	30																				
$R_4, \text{ Ом}$	30																				
$X_{L1}, \text{ Ом}$	0																				
$X_{L2}, \text{ Ом}$	0																				
$X_{L3}, \text{ Ом}$	30																				
$X_{C1}, \text{ Ом}$	5																				
$X_{C2}, \text{ Ом}$	10																				
 <p style="text-align: center;">Рисунок 1</p>	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="width: 50%;">$\underline{E}, \text{ В}$</td><td style="width: 50%; text-align: right;">$190 \angle 100^\circ$</td></tr> <tr><td>$R_1, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">0</td></tr> <tr><td>$R_2, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">20</td></tr> <tr><td>$R_3, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">0</td></tr> <tr><td>$R_4, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">30</td></tr> <tr><td>$X_{L1}, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">0</td></tr> <tr><td>$X_{L2}, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">0</td></tr> <tr><td>$X_{L3}, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">30</td></tr> <tr><td>$X_{C1}, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">5</td></tr> <tr><td>$X_{C2}, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">10</td></tr> </table>	$\underline{E}, \text{ В}$	$190 \angle 100^\circ$	$R_1, \text{ Ом}$	0	$R_2, \text{ Ом}$	20	$R_3, \text{ Ом}$	0	$R_4, \text{ Ом}$	30	$X_{L1}, \text{ Ом}$	0	$X_{L2}, \text{ Ом}$	0	$X_{L3}, \text{ Ом}$	30	$X_{C1}, \text{ Ом}$	5	$X_{C2}, \text{ Ом}$	10
$\underline{E}, \text{ В}$	$190 \angle 100^\circ$																				
$R_1, \text{ Ом}$	0																				
$R_2, \text{ Ом}$	20																				
$R_3, \text{ Ом}$	0																				
$R_4, \text{ Ом}$	30																				
$X_{L1}, \text{ Ом}$	0																				
$X_{L2}, \text{ Ом}$	0																				
$X_{L3}, \text{ Ом}$	30																				
$X_{C1}, \text{ Ом}$	5																				
$X_{C2}, \text{ Ом}$	10																				
<p style="text-align: center;">Варіант №10</p> <p>Завдання:</p> <p>1. Знайти комплексні опори Т- подібної схеми заміщення.</p>	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="width: 50%;">$R_2, \text{ Ом}$</td><td style="width: 50%; text-align: right;">20</td></tr> <tr><td>$R_3, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">0</td></tr> </table>	$R_2, \text{ Ом}$	20	$R_3, \text{ Ом}$	0																
$R_2, \text{ Ом}$	20																				
$R_3, \text{ Ом}$	0																				

<p style="text-align: center;">Рисунок 1</p>	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%;">$R_4, \text{ Ом}$</td> <td style="width: 50%;">30</td> </tr> <tr> <td>$X_{L1}, \text{ Ом}$</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>$X_{L2}, \text{ Ом}$</td> <td>20</td> </tr> <tr> <td>$X_{L3}, \text{ Ом}$</td> <td>30</td> </tr> <tr> <td>$X_{C1}, \text{ Ом}$</td> <td>5</td> </tr> <tr> <td>$X_{C2}, \text{ Ом}$</td> <td>10</td> </tr> </table>	$R_4, \text{ Ом}$	30	$X_{L1}, \text{ Ом}$	0	$X_{L2}, \text{ Ом}$	20	$X_{L3}, \text{ Ом}$	30	$X_{C1}, \text{ Ом}$	5	$X_{C2}, \text{ Ом}$	10
$R_4, \text{ Ом}$	30												
$X_{L1}, \text{ Ом}$	0												
$X_{L2}, \text{ Ом}$	20												
$X_{L3}, \text{ Ом}$	30												
$X_{C1}, \text{ Ом}$	5												
$X_{C2}, \text{ Ом}$	10												
<p style="text-align: center;">Варіант №11</p> <p>Завдання:</p> <p>1. Знайти комплексні опори П- подібної схеми заміщення.</p> <p>.</p>	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%;">$\underline{E}, \text{ В}$</td> <td style="width: 50%;">200∠110°</td> </tr> <tr> <td>$R_1, \text{ Ом}$</td> <td>10</td> </tr> <tr> <td>$R_2, \text{ Ом}$</td> <td>20</td> </tr> <tr> <td>$R_3, \text{ Ом}$</td> <td>30</td> </tr> <tr> <td>$R_4, \text{ Ом}$</td> <td>0</td> </tr> </table>	$\underline{E}, \text{ В}$	200∠110°	$R_1, \text{ Ом}$	10	$R_2, \text{ Ом}$	20	$R_3, \text{ Ом}$	30	$R_4, \text{ Ом}$	0		
$\underline{E}, \text{ В}$	200∠110°												
$R_1, \text{ Ом}$	10												
$R_2, \text{ Ом}$	20												
$R_3, \text{ Ом}$	30												
$R_4, \text{ Ом}$	0												
<p style="text-align: center;">Рисунок 1</p>	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%;">$X_{L1}, \text{ Ом}$</td> <td style="width: 50%;">10</td> </tr> <tr> <td>$X_{L2}, \text{ Ом}$</td> <td>20</td> </tr> <tr> <td>$X_{L3}, \text{ Ом}$</td> <td>30</td> </tr> <tr> <td>$X_{C1}, \text{ Ом}$</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>$X_{C2}, \text{ Ом}$</td> <td>10</td> </tr> </table>	$X_{L1}, \text{ Ом}$	10	$X_{L2}, \text{ Ом}$	20	$X_{L3}, \text{ Ом}$	30	$X_{C1}, \text{ Ом}$	0	$X_{C2}, \text{ Ом}$	10		
$X_{L1}, \text{ Ом}$	10												
$X_{L2}, \text{ Ом}$	20												
$X_{L3}, \text{ Ом}$	30												
$X_{C1}, \text{ Ом}$	0												
$X_{C2}, \text{ Ом}$	10												
<p style="text-align: center;">Варіант №12</p> <p>Завдання:</p> <p>1. Знайти комплексні опори Т- подібної схеми заміщення.</p>	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%;">$\underline{E}, \text{ В}$</td> <td style="width: 50%;">210∠120°</td> </tr> <tr> <td>$R_1, \text{ Ом}$</td> <td>10</td> </tr> <tr> <td>$R_2, \text{ Ом}$</td> <td>0</td> </tr> </table>	$\underline{E}, \text{ В}$	210∠120°	$R_1, \text{ Ом}$	10	$R_2, \text{ Ом}$	0						
$\underline{E}, \text{ В}$	210∠120°												
$R_1, \text{ Ом}$	10												
$R_2, \text{ Ом}$	0												

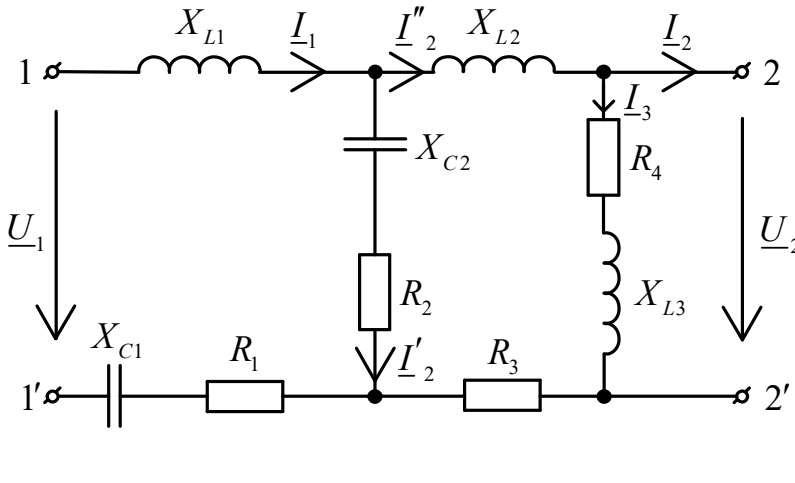
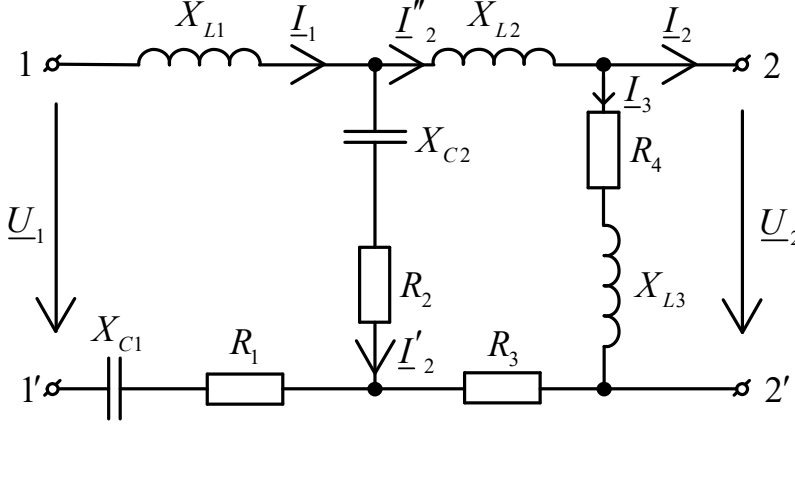
 <p style="text-align: center;">Рисунок 1</p>	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="width: 50%;">$R_3, \text{ Ом}$</td><td style="width: 50%; text-align: right;">30</td></tr> <tr><td>$R_4, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">0</td></tr> <tr><td>$X_{L1}, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">10</td></tr> <tr><td>$X_{L2}, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">0</td></tr> <tr><td>$X_{L3}, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">30</td></tr> <tr><td>$X_{C1}, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">0</td></tr> <tr><td>$X_{C2}, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">10</td></tr> </table>	$R_3, \text{ Ом}$	30	$R_4, \text{ Ом}$	0	$X_{L1}, \text{ Ом}$	10	$X_{L2}, \text{ Ом}$	0	$X_{L3}, \text{ Ом}$	30	$X_{C1}, \text{ Ом}$	0	$X_{C2}, \text{ Ом}$	10
$R_3, \text{ Ом}$	30														
$R_4, \text{ Ом}$	0														
$X_{L1}, \text{ Ом}$	10														
$X_{L2}, \text{ Ом}$	0														
$X_{L3}, \text{ Ом}$	30														
$X_{C1}, \text{ Ом}$	0														
$X_{C2}, \text{ Ом}$	10														
<p style="text-align: center;">Варіант №13</p> <p>Завдання:</p> <p>1. Знайти комплексні опори П- подібної схеми заміщення.</p>	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="width: 50%;">$\underline{E}, \text{ В}$</td><td style="width: 50%; text-align: right;">$220 \angle 130^\circ$</td></tr> <tr><td>$R_1, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">0</td></tr> <tr><td>$R_2, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">20</td></tr> <tr><td>$R_3, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">30</td></tr> </table>	$\underline{E}, \text{ В}$	$220 \angle 130^\circ$	$R_1, \text{ Ом}$	0	$R_2, \text{ Ом}$	20	$R_3, \text{ Ом}$	30						
$\underline{E}, \text{ В}$	$220 \angle 130^\circ$														
$R_1, \text{ Ом}$	0														
$R_2, \text{ Ом}$	20														
$R_3, \text{ Ом}$	30														
 <p style="text-align: center;">Рисунок 1</p>	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="width: 50%;">$R_4, \text{ Ом}$</td><td style="width: 50%; text-align: right;">30</td></tr> <tr><td>$X_{L1}, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">10</td></tr> <tr><td>$X_{L2}, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">20</td></tr> <tr><td>$X_{L3}, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">30</td></tr> <tr><td>$X_{C1}, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">0</td></tr> <tr><td>$X_{C2}, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">10</td></tr> </table>	$R_4, \text{ Ом}$	30	$X_{L1}, \text{ Ом}$	10	$X_{L2}, \text{ Ом}$	20	$X_{L3}, \text{ Ом}$	30	$X_{C1}, \text{ Ом}$	0	$X_{C2}, \text{ Ом}$	10		
$R_4, \text{ Ом}$	30														
$X_{L1}, \text{ Ом}$	10														
$X_{L2}, \text{ Ом}$	20														
$X_{L3}, \text{ Ом}$	30														
$X_{C1}, \text{ Ом}$	0														
$X_{C2}, \text{ Ом}$	10														
<p style="text-align: center;">Варіант №14</p> <p>Завдання:</p> <p>1. Знайти комплексні опори Т- подібної схеми заміщення.</p>	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="width: 50%;">$\underline{E}, \text{ В}$</td><td style="width: 50%; text-align: right;">$230 \angle 140^\circ$</td></tr> <tr><td>$R_1, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">0</td></tr> <tr><td>$R_2, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">20</td></tr> </table>	$\underline{E}, \text{ В}$	$230 \angle 140^\circ$	$R_1, \text{ Ом}$	0	$R_2, \text{ Ом}$	20								
$\underline{E}, \text{ В}$	$230 \angle 140^\circ$														
$R_1, \text{ Ом}$	0														
$R_2, \text{ Ом}$	20														

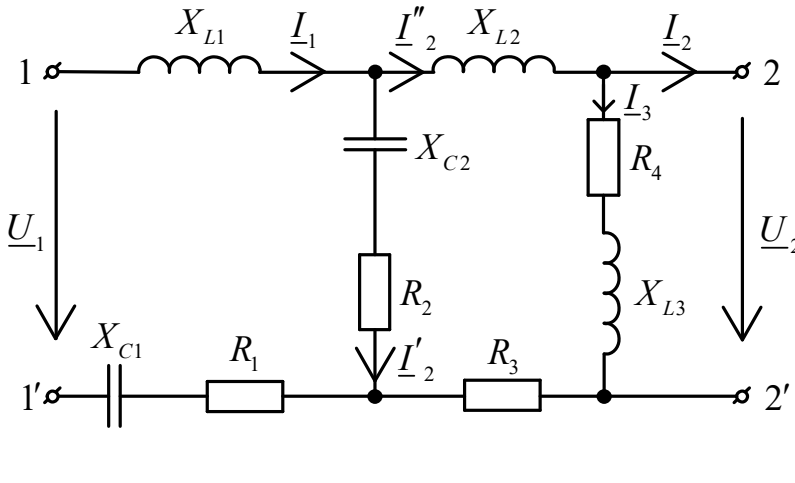
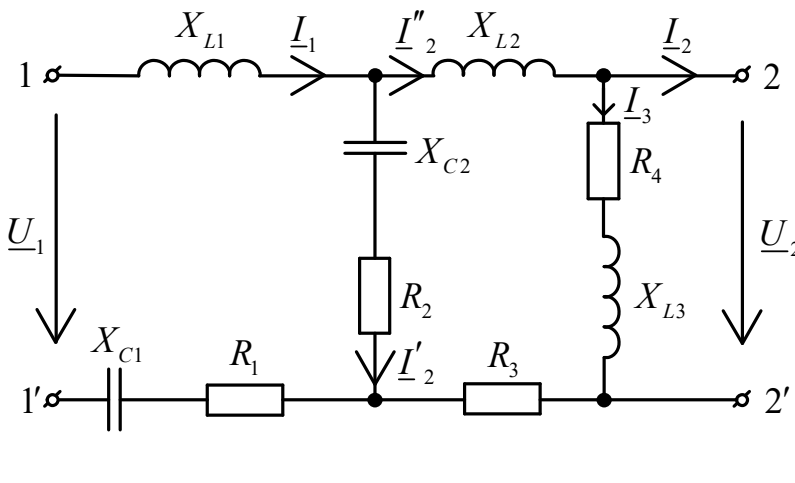
 <p style="text-align: center;">Рисунок 1</p>	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="width: 50%;">$R_3, \text{ Ом}$</td><td style="width: 50%; text-align: right;">30</td></tr> <tr><td>$R_4, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">30</td></tr> <tr><td>$X_{L1}, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">10</td></tr> <tr><td>$X_{L2}, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">20</td></tr> <tr><td>$X_{L3}, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">30</td></tr> <tr><td>$X_{C1}, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">0</td></tr> <tr><td>$X_{C2}, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">10</td></tr> </table>	$R_3, \text{ Ом}$	30	$R_4, \text{ Ом}$	30	$X_{L1}, \text{ Ом}$	10	$X_{L2}, \text{ Ом}$	20	$X_{L3}, \text{ Ом}$	30	$X_{C1}, \text{ Ом}$	0	$X_{C2}, \text{ Ом}$	10						
$R_3, \text{ Ом}$	30																				
$R_4, \text{ Ом}$	30																				
$X_{L1}, \text{ Ом}$	10																				
$X_{L2}, \text{ Ом}$	20																				
$X_{L3}, \text{ Ом}$	30																				
$X_{C1}, \text{ Ом}$	0																				
$X_{C2}, \text{ Ом}$	10																				
<p style="text-align: center;">Варіант №15</p> <p>Завдання:</p> <p>1. Знайти комплексні опори П- подібної схеми заміщення.</p>	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="width: 50%;">$\underline{E}, \text{ В}$</td><td style="width: 50%; text-align: right;">$240 \angle 150^\circ$</td></tr> <tr><td>$R_1, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">0</td></tr> <tr><td>$R_2, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">20</td></tr> <tr><td>$R_3, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">30</td></tr> <tr><td>$R_4, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">0</td></tr> <tr><td>$X_{L1}, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">10</td></tr> <tr><td>$X_{L2}, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">20</td></tr> <tr><td>$X_{L3}, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">30</td></tr> <tr><td>$X_{C1}, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">5</td></tr> <tr><td>$X_{C2}, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">10</td></tr> </table>	$\underline{E}, \text{ В}$	$240 \angle 150^\circ$	$R_1, \text{ Ом}$	0	$R_2, \text{ Ом}$	20	$R_3, \text{ Ом}$	30	$R_4, \text{ Ом}$	0	$X_{L1}, \text{ Ом}$	10	$X_{L2}, \text{ Ом}$	20	$X_{L3}, \text{ Ом}$	30	$X_{C1}, \text{ Ом}$	5	$X_{C2}, \text{ Ом}$	10
$\underline{E}, \text{ В}$	$240 \angle 150^\circ$																				
$R_1, \text{ Ом}$	0																				
$R_2, \text{ Ом}$	20																				
$R_3, \text{ Ом}$	30																				
$R_4, \text{ Ом}$	0																				
$X_{L1}, \text{ Ом}$	10																				
$X_{L2}, \text{ Ом}$	20																				
$X_{L3}, \text{ Ом}$	30																				
$X_{C1}, \text{ Ом}$	5																				
$X_{C2}, \text{ Ом}$	10																				
 <p style="text-align: center;">Рисунок 1</p>	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="width: 50%;">$\underline{E}, \text{ В}$</td><td style="width: 50%; text-align: right;">$250 \angle 160^\circ$</td></tr> <tr><td>$R_1, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">0</td></tr> <tr><td>$R_2, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">0</td></tr> </table>	$\underline{E}, \text{ В}$	$250 \angle 160^\circ$	$R_1, \text{ Ом}$	0	$R_2, \text{ Ом}$	0														
$\underline{E}, \text{ В}$	$250 \angle 160^\circ$																				
$R_1, \text{ Ом}$	0																				
$R_2, \text{ Ом}$	0																				
<p style="text-align: center;">Варіант №16</p> <p>Завдання:</p> <p>1. Знайти комплексні опори Т- подібної схеми заміщення.</p>	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="width: 50%;">$\underline{E}, \text{ В}$</td><td style="width: 50%; text-align: right;">$250 \angle 160^\circ$</td></tr> <tr><td>$R_1, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">0</td></tr> <tr><td>$R_2, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">0</td></tr> </table>	$\underline{E}, \text{ В}$	$250 \angle 160^\circ$	$R_1, \text{ Ом}$	0	$R_2, \text{ Ом}$	0														
$\underline{E}, \text{ В}$	$250 \angle 160^\circ$																				
$R_1, \text{ Ом}$	0																				
$R_2, \text{ Ом}$	0																				

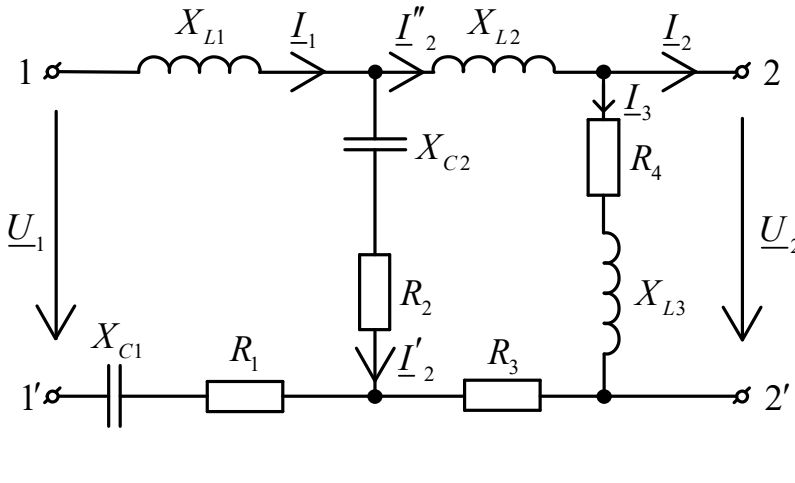
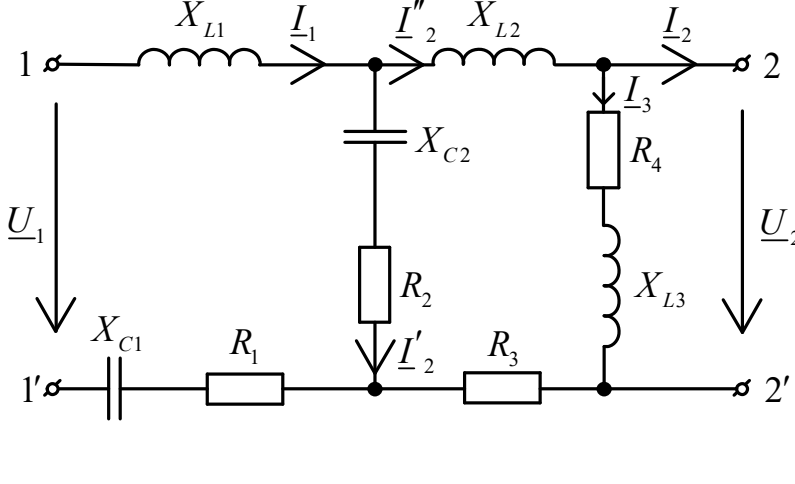
 <p style="text-align: center;">Рисунок 1</p>	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="width: 50%;">$R_3, \text{ Ом}$</td><td style="width: 50%; text-align: right;">30</td></tr> <tr><td>$R_4, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">30</td></tr> <tr><td>$X_{L1}, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">10</td></tr> <tr><td>$X_{L2}, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">20</td></tr> <tr><td>$X_{L3}, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">30</td></tr> <tr><td>$X_{C1}, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">5</td></tr> <tr><td>$X_{C2}, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">10</td></tr> </table>	$R_3, \text{ Ом}$	30	$R_4, \text{ Ом}$	30	$X_{L1}, \text{ Ом}$	10	$X_{L2}, \text{ Ом}$	20	$X_{L3}, \text{ Ом}$	30	$X_{C1}, \text{ Ом}$	5	$X_{C2}, \text{ Ом}$	10						
$R_3, \text{ Ом}$	30																				
$R_4, \text{ Ом}$	30																				
$X_{L1}, \text{ Ом}$	10																				
$X_{L2}, \text{ Ом}$	20																				
$X_{L3}, \text{ Ом}$	30																				
$X_{C1}, \text{ Ом}$	5																				
$X_{C2}, \text{ Ом}$	10																				
<p style="text-align: center;">Варіант №17</p> <p>Завдання:</p> <p>1. Знайти комплексні опори П- подібної схеми заміщення.</p>	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="width: 50%;">$\underline{E}, \text{ В}$</td><td style="width: 50%; text-align: right;">$260 \angle 170^\circ$</td></tr> <tr><td>$R_1, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">10</td></tr> <tr><td>$R_2, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">20</td></tr> <tr><td>$R_3, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">0</td></tr> <tr><td>$R_4, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">30</td></tr> <tr><td>$X_{L1}, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">0</td></tr> <tr><td>$X_{L2}, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">0</td></tr> <tr><td>$X_{L3}, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">30</td></tr> <tr><td>$X_{C1}, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">5</td></tr> <tr><td>$X_{C2}, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">10</td></tr> </table>	$\underline{E}, \text{ В}$	$260 \angle 170^\circ$	$R_1, \text{ Ом}$	10	$R_2, \text{ Ом}$	20	$R_3, \text{ Ом}$	0	$R_4, \text{ Ом}$	30	$X_{L1}, \text{ Ом}$	0	$X_{L2}, \text{ Ом}$	0	$X_{L3}, \text{ Ом}$	30	$X_{C1}, \text{ Ом}$	5	$X_{C2}, \text{ Ом}$	10
$\underline{E}, \text{ В}$	$260 \angle 170^\circ$																				
$R_1, \text{ Ом}$	10																				
$R_2, \text{ Ом}$	20																				
$R_3, \text{ Ом}$	0																				
$R_4, \text{ Ом}$	30																				
$X_{L1}, \text{ Ом}$	0																				
$X_{L2}, \text{ Ом}$	0																				
$X_{L3}, \text{ Ом}$	30																				
$X_{C1}, \text{ Ом}$	5																				
$X_{C2}, \text{ Ом}$	10																				
 <p style="text-align: center;">Рисунок 1</p>	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="width: 50%;">$\underline{E}, \text{ В}$</td><td style="width: 50%; text-align: right;">$270 \angle 180^\circ$</td></tr> <tr><td>$R_1, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">10</td></tr> <tr><td>$R_2, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">20</td></tr> </table>	$\underline{E}, \text{ В}$	$270 \angle 180^\circ$	$R_1, \text{ Ом}$	10	$R_2, \text{ Ом}$	20														
$\underline{E}, \text{ В}$	$270 \angle 180^\circ$																				
$R_1, \text{ Ом}$	10																				
$R_2, \text{ Ом}$	20																				
<p style="text-align: center;">Варіант №18</p> <p>Завдання:</p> <p>1. Знайти комплексні опори Т- подібної схеми заміщення.</p>	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="width: 50%;">$\underline{E}, \text{ В}$</td><td style="width: 50%; text-align: right;">$270 \angle 180^\circ$</td></tr> <tr><td>$R_1, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">10</td></tr> <tr><td>$R_2, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">20</td></tr> </table>	$\underline{E}, \text{ В}$	$270 \angle 180^\circ$	$R_1, \text{ Ом}$	10	$R_2, \text{ Ом}$	20														
$\underline{E}, \text{ В}$	$270 \angle 180^\circ$																				
$R_1, \text{ Ом}$	10																				
$R_2, \text{ Ом}$	20																				

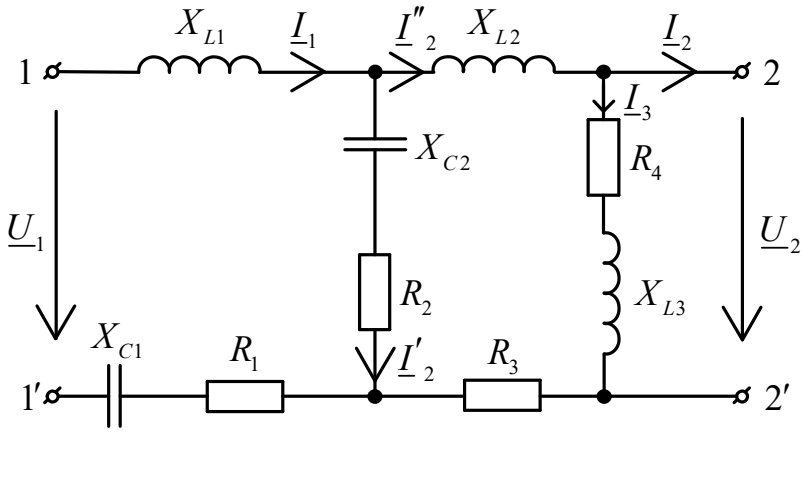
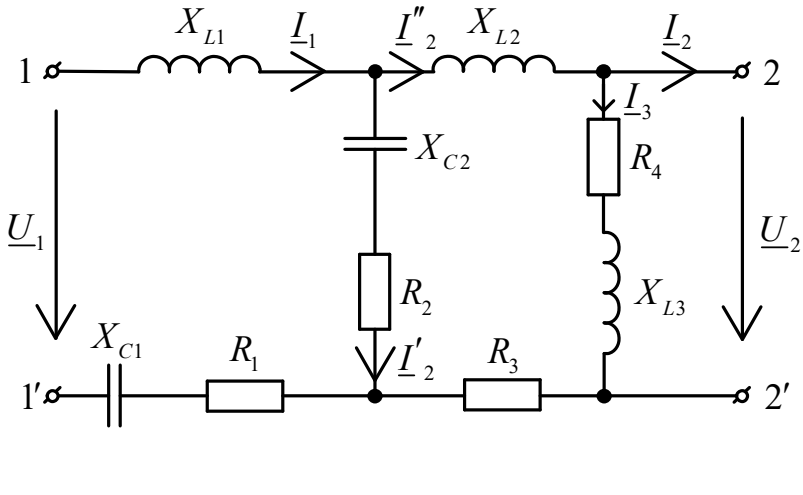
 <p style="text-align: center;">Рисунок 1</p>	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="width: 50%;">$R_3, \text{ Ом}$</td><td style="width: 50%; text-align: right;">30</td></tr> <tr><td>$R_4, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">30</td></tr> <tr><td>$X_{L1}, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">10</td></tr> <tr><td>$X_{L2}, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">0</td></tr> <tr><td>$X_{L3}, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">30</td></tr> <tr><td>$X_{C1}, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">5</td></tr> <tr><td>$X_{C2}, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">0</td></tr> </table>	$R_3, \text{ Ом}$	30	$R_4, \text{ Ом}$	30	$X_{L1}, \text{ Ом}$	10	$X_{L2}, \text{ Ом}$	0	$X_{L3}, \text{ Ом}$	30	$X_{C1}, \text{ Ом}$	5	$X_{C2}, \text{ Ом}$	0						
$R_3, \text{ Ом}$	30																				
$R_4, \text{ Ом}$	30																				
$X_{L1}, \text{ Ом}$	10																				
$X_{L2}, \text{ Ом}$	0																				
$X_{L3}, \text{ Ом}$	30																				
$X_{C1}, \text{ Ом}$	5																				
$X_{C2}, \text{ Ом}$	0																				
<p style="text-align: center;">Варіант №19</p> <p>Завдання:</p> <p>1. Знайти комплексні опори П- подібної схеми заміщення.</p>	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="width: 50%;">$\underline{E}, \text{ В}$</td><td style="width: 50%; text-align: right;">$280 \angle 190^\circ$</td></tr> <tr><td>$R_1, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">10</td></tr> <tr><td>$R_2, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">20</td></tr> <tr><td>$R_3, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">30</td></tr> <tr><td>$R_4, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">30</td></tr> <tr><td>$X_{L1}, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">0</td></tr> <tr><td>$X_{L2}, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">20</td></tr> <tr><td>$X_{L3}, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">30</td></tr> <tr><td>$X_{C1}, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">0</td></tr> <tr><td>$X_{C2}, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">10</td></tr> </table>	$\underline{E}, \text{ В}$	$280 \angle 190^\circ$	$R_1, \text{ Ом}$	10	$R_2, \text{ Ом}$	20	$R_3, \text{ Ом}$	30	$R_4, \text{ Ом}$	30	$X_{L1}, \text{ Ом}$	0	$X_{L2}, \text{ Ом}$	20	$X_{L3}, \text{ Ом}$	30	$X_{C1}, \text{ Ом}$	0	$X_{C2}, \text{ Ом}$	10
$\underline{E}, \text{ В}$	$280 \angle 190^\circ$																				
$R_1, \text{ Ом}$	10																				
$R_2, \text{ Ом}$	20																				
$R_3, \text{ Ом}$	30																				
$R_4, \text{ Ом}$	30																				
$X_{L1}, \text{ Ом}$	0																				
$X_{L2}, \text{ Ом}$	20																				
$X_{L3}, \text{ Ом}$	30																				
$X_{C1}, \text{ Ом}$	0																				
$X_{C2}, \text{ Ом}$	10																				
 <p style="text-align: center;">Рисунок 1</p>	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="width: 50%;">$\underline{E}, \text{ В}$</td><td style="width: 50%; text-align: right;">$290 \angle 200^\circ$</td></tr> <tr><td>$R_1, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">0</td></tr> <tr><td>$R_2, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">20</td></tr> <tr><td>$R_3, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">30</td></tr> </table>	$\underline{E}, \text{ В}$	$290 \angle 200^\circ$	$R_1, \text{ Ом}$	0	$R_2, \text{ Ом}$	20	$R_3, \text{ Ом}$	30												
$\underline{E}, \text{ В}$	$290 \angle 200^\circ$																				
$R_1, \text{ Ом}$	0																				
$R_2, \text{ Ом}$	20																				
$R_3, \text{ Ом}$	30																				
<p style="text-align: center;">Варіант №20</p> <p>Завдання:</p> <p>1. Знайти комплексні опори Т- подібної схеми заміщення.</p>	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="width: 50%;">$R_2, \text{ Ом}$</td><td style="width: 50%; text-align: right;">20</td></tr> <tr><td>$R_3, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">30</td></tr> </table>	$R_2, \text{ Ом}$	20	$R_3, \text{ Ом}$	30																
$R_2, \text{ Ом}$	20																				
$R_3, \text{ Ом}$	30																				

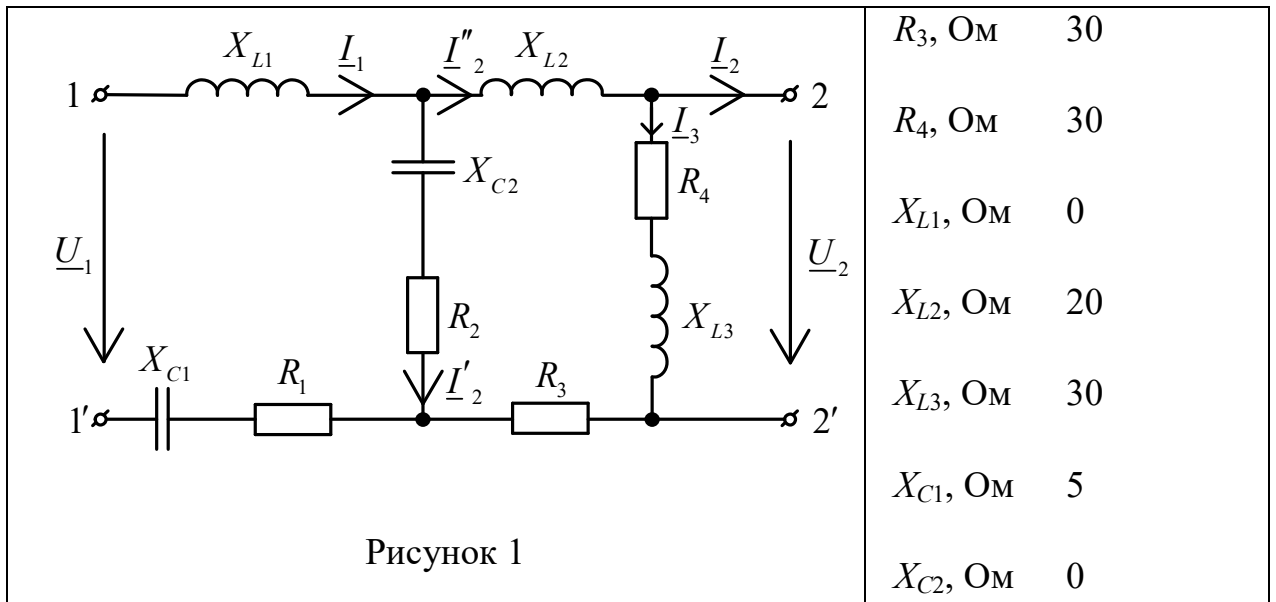
<p style="text-align: center;">Рисунок 1</p>	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%;">$R_4, \text{ Ом}$</td> <td style="width: 50%;">0</td> </tr> <tr> <td>$X_{L1}, \text{ Ом}$</td> <td>10</td> </tr> <tr> <td>$X_{L2}, \text{ Ом}$</td> <td>20</td> </tr> <tr> <td>$X_{L3}, \text{ Ом}$</td> <td>30</td> </tr> <tr> <td>$X_{C1}, \text{ Ом}$</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>$X_{C2}, \text{ Ом}$</td> <td>10</td> </tr> </table>	$R_4, \text{ Ом}$	0	$X_{L1}, \text{ Ом}$	10	$X_{L2}, \text{ Ом}$	20	$X_{L3}, \text{ Ом}$	30	$X_{C1}, \text{ Ом}$	0	$X_{C2}, \text{ Ом}$	10
$R_4, \text{ Ом}$	0												
$X_{L1}, \text{ Ом}$	10												
$X_{L2}, \text{ Ом}$	20												
$X_{L3}, \text{ Ом}$	30												
$X_{C1}, \text{ Ом}$	0												
$X_{C2}, \text{ Ом}$	10												
<p style="text-align: center;">Варіант №21</p> <p>Завдання:</p> <p>1. Знайти комплексні опори П- подібної схеми заміщення.</p> <p>.</p>	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%;">$\underline{E}, \text{ В}$</td> <td style="width: 50%;">300∠210°</td> </tr> <tr> <td>$R_1, \text{ Ом}$</td> <td>10</td> </tr> <tr> <td>$R_2, \text{ Ом}$</td> <td>20</td> </tr> <tr> <td>$R_3, \text{ Ом}$</td> <td>30</td> </tr> <tr> <td>$R_4, \text{ Ом}$</td> <td>30</td> </tr> </table>	$\underline{E}, \text{ В}$	300∠210°	$R_1, \text{ Ом}$	10	$R_2, \text{ Ом}$	20	$R_3, \text{ Ом}$	30	$R_4, \text{ Ом}$	30		
$\underline{E}, \text{ В}$	300∠210°												
$R_1, \text{ Ом}$	10												
$R_2, \text{ Ом}$	20												
$R_3, \text{ Ом}$	30												
$R_4, \text{ Ом}$	30												
<p style="text-align: center;">Рисунок 1</p>	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%;">$X_{L1}, \text{ Ом}$</td> <td style="width: 50%;">0</td> </tr> <tr> <td>$X_{L2}, \text{ Ом}$</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>$X_{L3}, \text{ Ом}$</td> <td>30</td> </tr> <tr> <td>$X_{C1}, \text{ Ом}$</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>$X_{C2}, \text{ Ом}$</td> <td>10</td> </tr> </table>	$X_{L1}, \text{ Ом}$	0	$X_{L2}, \text{ Ом}$	0	$X_{L3}, \text{ Ом}$	30	$X_{C1}, \text{ Ом}$	0	$X_{C2}, \text{ Ом}$	10		
$X_{L1}, \text{ Ом}$	0												
$X_{L2}, \text{ Ом}$	0												
$X_{L3}, \text{ Ом}$	30												
$X_{C1}, \text{ Ом}$	0												
$X_{C2}, \text{ Ом}$	10												
<p style="text-align: center;">Варіант №22</p> <p>Завдання:</p> <p>1. Знайти комплексні опори Т- подібної схеми заміщення.</p>	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%;">$\underline{E}, \text{ В}$</td> <td style="width: 50%;">310∠220°</td> </tr> <tr> <td>$R_1, \text{ Ом}$</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>$R_2, \text{ Ом}$</td> <td>20</td> </tr> </table>	$\underline{E}, \text{ В}$	310∠220°	$R_1, \text{ Ом}$	0	$R_2, \text{ Ом}$	20						
$\underline{E}, \text{ В}$	310∠220°												
$R_1, \text{ Ом}$	0												
$R_2, \text{ Ом}$	20												

 <p style="text-align: center;">Рисунок 1</p>	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="width: 50%;">$R_3, \text{ Ом}$</td><td style="width: 50%;">0</td></tr> <tr><td>$R_4, \text{ Ом}$</td><td>30</td></tr> <tr><td>$X_{L1}, \text{ Ом}$</td><td>0</td></tr> <tr><td>$X_{L2}, \text{ Ом}$</td><td>20</td></tr> <tr><td>$X_{L3}, \text{ Ом}$</td><td>30</td></tr> <tr><td>$X_{C1}, \text{ Ом}$</td><td>5</td></tr> <tr><td>$X_{C2}, \text{ Ом}$</td><td>0</td></tr> </table>	$R_3, \text{ Ом}$	0	$R_4, \text{ Ом}$	30	$X_{L1}, \text{ Ом}$	0	$X_{L2}, \text{ Ом}$	20	$X_{L3}, \text{ Ом}$	30	$X_{C1}, \text{ Ом}$	5	$X_{C2}, \text{ Ом}$	0						
$R_3, \text{ Ом}$	0																				
$R_4, \text{ Ом}$	30																				
$X_{L1}, \text{ Ом}$	0																				
$X_{L2}, \text{ Ом}$	20																				
$X_{L3}, \text{ Ом}$	30																				
$X_{C1}, \text{ Ом}$	5																				
$X_{C2}, \text{ Ом}$	0																				
<p style="text-align: center;">Варіант №23</p> <p>Завдання:</p> <p>1. Знайти комплексні опори П- подібної схеми заміщення.</p>	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="width: 50%;">$\underline{E}, \text{ В}$</td><td style="width: 50%;">320∠230°</td></tr> <tr><td>$R_1, \text{ Ом}$</td><td>10</td></tr> <tr><td>$R_2, \text{ Ом}$</td><td>20</td></tr> <tr><td>$R_3, \text{ Ом}$</td><td>30</td></tr> <tr><td>$R_4, \text{ Ом}$</td><td>0</td></tr> <tr><td>$X_{L1}, \text{ Ом}$</td><td>10</td></tr> <tr><td>$X_{L2}, \text{ Ом}$</td><td>20</td></tr> <tr><td>$X_{L3}, \text{ Ом}$</td><td>30</td></tr> <tr><td>$X_{C1}, \text{ Ом}$</td><td>0</td></tr> <tr><td>$X_{C2}, \text{ Ом}$</td><td>0</td></tr> </table>	$\underline{E}, \text{ В}$	320∠230°	$R_1, \text{ Ом}$	10	$R_2, \text{ Ом}$	20	$R_3, \text{ Ом}$	30	$R_4, \text{ Ом}$	0	$X_{L1}, \text{ Ом}$	10	$X_{L2}, \text{ Ом}$	20	$X_{L3}, \text{ Ом}$	30	$X_{C1}, \text{ Ом}$	0	$X_{C2}, \text{ Ом}$	0
$\underline{E}, \text{ В}$	320∠230°																				
$R_1, \text{ Ом}$	10																				
$R_2, \text{ Ом}$	20																				
$R_3, \text{ Ом}$	30																				
$R_4, \text{ Ом}$	0																				
$X_{L1}, \text{ Ом}$	10																				
$X_{L2}, \text{ Ом}$	20																				
$X_{L3}, \text{ Ом}$	30																				
$X_{C1}, \text{ Ом}$	0																				
$X_{C2}, \text{ Ом}$	0																				
 <p style="text-align: center;">Рисунок 1</p>	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="width: 50%;">$\underline{E}, \text{ В}$</td><td style="width: 50%;">330∠240°</td></tr> <tr><td>$R_1, \text{ Ом}$</td><td>10</td></tr> <tr><td>$R_2, \text{ Ом}$</td><td>0</td></tr> <tr><td>$R_3, \text{ Ом}$</td><td>0</td></tr> <tr><td>$R_4, \text{ Ом}$</td><td>0</td></tr> <tr><td>$X_{L1}, \text{ Ом}$</td><td>10</td></tr> <tr><td>$X_{L2}, \text{ Ом}$</td><td>20</td></tr> <tr><td>$X_{L3}, \text{ Ом}$</td><td>30</td></tr> <tr><td>$X_{C1}, \text{ Ом}$</td><td>0</td></tr> <tr><td>$X_{C2}, \text{ Ом}$</td><td>0</td></tr> </table>	$\underline{E}, \text{ В}$	330∠240°	$R_1, \text{ Ом}$	10	$R_2, \text{ Ом}$	0	$R_3, \text{ Ом}$	0	$R_4, \text{ Ом}$	0	$X_{L1}, \text{ Ом}$	10	$X_{L2}, \text{ Ом}$	20	$X_{L3}, \text{ Ом}$	30	$X_{C1}, \text{ Ом}$	0	$X_{C2}, \text{ Ом}$	0
$\underline{E}, \text{ В}$	330∠240°																				
$R_1, \text{ Ом}$	10																				
$R_2, \text{ Ом}$	0																				
$R_3, \text{ Ом}$	0																				
$R_4, \text{ Ом}$	0																				
$X_{L1}, \text{ Ом}$	10																				
$X_{L2}, \text{ Ом}$	20																				
$X_{L3}, \text{ Ом}$	30																				
$X_{C1}, \text{ Ом}$	0																				
$X_{C2}, \text{ Ом}$	0																				
<p style="text-align: center;">Варіант №24</p> <p>Завдання:</p> <p>1. Знайти комплексні опори Т- подібної схеми заміщення.</p>	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="width: 50%;">$\underline{E}, \text{ В}$</td><td style="width: 50%;">330∠240°</td></tr> <tr><td>$R_1, \text{ Ом}$</td><td>10</td></tr> <tr><td>$R_2, \text{ Ом}$</td><td>0</td></tr> <tr><td>$R_3, \text{ Ом}$</td><td>0</td></tr> <tr><td>$R_4, \text{ Ом}$</td><td>0</td></tr> <tr><td>$X_{L1}, \text{ Ом}$</td><td>10</td></tr> <tr><td>$X_{L2}, \text{ Ом}$</td><td>20</td></tr> <tr><td>$X_{L3}, \text{ Ом}$</td><td>30</td></tr> <tr><td>$X_{C1}, \text{ Ом}$</td><td>0</td></tr> <tr><td>$X_{C2}, \text{ Ом}$</td><td>0</td></tr> </table>	$\underline{E}, \text{ В}$	330∠240°	$R_1, \text{ Ом}$	10	$R_2, \text{ Ом}$	0	$R_3, \text{ Ом}$	0	$R_4, \text{ Ом}$	0	$X_{L1}, \text{ Ом}$	10	$X_{L2}, \text{ Ом}$	20	$X_{L3}, \text{ Ом}$	30	$X_{C1}, \text{ Ом}$	0	$X_{C2}, \text{ Ом}$	0
$\underline{E}, \text{ В}$	330∠240°																				
$R_1, \text{ Ом}$	10																				
$R_2, \text{ Ом}$	0																				
$R_3, \text{ Ом}$	0																				
$R_4, \text{ Ом}$	0																				
$X_{L1}, \text{ Ом}$	10																				
$X_{L2}, \text{ Ом}$	20																				
$X_{L3}, \text{ Ом}$	30																				
$X_{C1}, \text{ Ом}$	0																				
$X_{C2}, \text{ Ом}$	0																				

 <p style="text-align: center;">Рисунок 1</p>	<table border="0"> <tr><td>$R_3, \text{ Ом}$</td><td>30</td></tr> <tr><td>$R_4, \text{ Ом}$</td><td>0</td></tr> <tr><td>$X_{L1}, \text{ Ом}$</td><td>10</td></tr> <tr><td>$X_{L2}, \text{ Ом}$</td><td>0</td></tr> <tr><td>$X_{L3}, \text{ Ом}$</td><td>30</td></tr> <tr><td>$X_{C1}, \text{ Ом}$</td><td>0</td></tr> <tr><td>$X_{C2}, \text{ Ом}$</td><td>10</td></tr> </table>	$R_3, \text{ Ом}$	30	$R_4, \text{ Ом}$	0	$X_{L1}, \text{ Ом}$	10	$X_{L2}, \text{ Ом}$	0	$X_{L3}, \text{ Ом}$	30	$X_{C1}, \text{ Ом}$	0	$X_{C2}, \text{ Ом}$	10						
$R_3, \text{ Ом}$	30																				
$R_4, \text{ Ом}$	0																				
$X_{L1}, \text{ Ом}$	10																				
$X_{L2}, \text{ Ом}$	0																				
$X_{L3}, \text{ Ом}$	30																				
$X_{C1}, \text{ Ом}$	0																				
$X_{C2}, \text{ Ом}$	10																				
<p style="text-align: center;">Варіант №25</p> <p>Завдання:</p> <p>1. Знайти комплексні опори П- подібної схеми заміщення.</p>	<table border="0"> <tr><td>$\underline{E}, \text{ В}$</td><td>$340 \angle 250^\circ$</td></tr> <tr><td>$R_1, \text{ Ом}$</td><td>0</td></tr> <tr><td>$R_2, \text{ Ом}$</td><td>20</td></tr> <tr><td>$R_3, \text{ Ом}$</td><td>30</td></tr> <tr><td>$R_4, \text{ Ом}$</td><td>30</td></tr> <tr><td>$X_{L1}, \text{ Ом}$</td><td>0</td></tr> <tr><td>$X_{L2}, \text{ Ом}$</td><td>20</td></tr> <tr><td>$X_{L3}, \text{ Ом}$</td><td>30</td></tr> <tr><td>$X_{C1}, \text{ Ом}$</td><td>0</td></tr> <tr><td>$X_{C2}, \text{ Ом}$</td><td>10</td></tr> </table>	$\underline{E}, \text{ В}$	$340 \angle 250^\circ$	$R_1, \text{ Ом}$	0	$R_2, \text{ Ом}$	20	$R_3, \text{ Ом}$	30	$R_4, \text{ Ом}$	30	$X_{L1}, \text{ Ом}$	0	$X_{L2}, \text{ Ом}$	20	$X_{L3}, \text{ Ом}$	30	$X_{C1}, \text{ Ом}$	0	$X_{C2}, \text{ Ом}$	10
$\underline{E}, \text{ В}$	$340 \angle 250^\circ$																				
$R_1, \text{ Ом}$	0																				
$R_2, \text{ Ом}$	20																				
$R_3, \text{ Ом}$	30																				
$R_4, \text{ Ом}$	30																				
$X_{L1}, \text{ Ом}$	0																				
$X_{L2}, \text{ Ом}$	20																				
$X_{L3}, \text{ Ом}$	30																				
$X_{C1}, \text{ Ом}$	0																				
$X_{C2}, \text{ Ом}$	10																				
 <p style="text-align: center;">Рисунок 1</p>	<table border="0"> <tr><td>$\underline{E}, \text{ В}$</td><td>$350 \angle 260^\circ$</td></tr> <tr><td>$R_1, \text{ Ом}$</td><td>10</td></tr> <tr><td>$R_2, \text{ Ом}$</td><td>20</td></tr> <tr><td>$R_3, \text{ Ом}$</td><td>30</td></tr> <tr><td>$R_4, \text{ Ом}$</td><td>30</td></tr> <tr><td>$X_{L1}, \text{ Ом}$</td><td>0</td></tr> <tr><td>$X_{L2}, \text{ Ом}$</td><td>20</td></tr> <tr><td>$X_{L3}, \text{ Ом}$</td><td>30</td></tr> <tr><td>$X_{C1}, \text{ Ом}$</td><td>0</td></tr> <tr><td>$X_{C2}, \text{ Ом}$</td><td>10</td></tr> </table>	$\underline{E}, \text{ В}$	$350 \angle 260^\circ$	$R_1, \text{ Ом}$	10	$R_2, \text{ Ом}$	20	$R_3, \text{ Ом}$	30	$R_4, \text{ Ом}$	30	$X_{L1}, \text{ Ом}$	0	$X_{L2}, \text{ Ом}$	20	$X_{L3}, \text{ Ом}$	30	$X_{C1}, \text{ Ом}$	0	$X_{C2}, \text{ Ом}$	10
$\underline{E}, \text{ В}$	$350 \angle 260^\circ$																				
$R_1, \text{ Ом}$	10																				
$R_2, \text{ Ом}$	20																				
$R_3, \text{ Ом}$	30																				
$R_4, \text{ Ом}$	30																				
$X_{L1}, \text{ Ом}$	0																				
$X_{L2}, \text{ Ом}$	20																				
$X_{L3}, \text{ Ом}$	30																				
$X_{C1}, \text{ Ом}$	0																				
$X_{C2}, \text{ Ом}$	10																				
<p style="text-align: center;">Варіант №26</p> <p>Завдання:</p> <p>1. Знайти комплексні опори Т- подібної схеми заміщення.</p>	<table border="0"> <tr><td>$\underline{E}, \text{ В}$</td><td>$350 \angle 260^\circ$</td></tr> <tr><td>$R_1, \text{ Ом}$</td><td>10</td></tr> <tr><td>$R_2, \text{ Ом}$</td><td>20</td></tr> </table>	$\underline{E}, \text{ В}$	$350 \angle 260^\circ$	$R_1, \text{ Ом}$	10	$R_2, \text{ Ом}$	20														
$\underline{E}, \text{ В}$	$350 \angle 260^\circ$																				
$R_1, \text{ Ом}$	10																				
$R_2, \text{ Ом}$	20																				

 <p style="text-align: center;">Рисунок 1</p>	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="width: 50%;">$R_3, \text{ Ом}$</td><td style="width: 50%; text-align: right;">30</td></tr> <tr><td>$R_4, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">30</td></tr> <tr><td>$X_{L1}, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">0</td></tr> <tr><td>$X_{L2}, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">0</td></tr> <tr><td>$X_{L3}, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">30</td></tr> <tr><td>$X_{C1}, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">5</td></tr> <tr><td>$X_{C2}, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">10</td></tr> </table>	$R_3, \text{ Ом}$	30	$R_4, \text{ Ом}$	30	$X_{L1}, \text{ Ом}$	0	$X_{L2}, \text{ Ом}$	0	$X_{L3}, \text{ Ом}$	30	$X_{C1}, \text{ Ом}$	5	$X_{C2}, \text{ Ом}$	10						
$R_3, \text{ Ом}$	30																				
$R_4, \text{ Ом}$	30																				
$X_{L1}, \text{ Ом}$	0																				
$X_{L2}, \text{ Ом}$	0																				
$X_{L3}, \text{ Ом}$	30																				
$X_{C1}, \text{ Ом}$	5																				
$X_{C2}, \text{ Ом}$	10																				
<p style="text-align: center;">Варіант №27</p> <p>Завдання:</p> <p>1. Знайти комплексні опори П- подібної схеми заміщення.</p>	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="width: 50%;">$\underline{E}, \text{ В}$</td><td style="width: 50%; text-align: right;">$360 \angle 270^\circ$</td></tr> <tr><td>$R_1, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">0</td></tr> <tr><td>$R_2, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">20</td></tr> <tr><td>$R_3, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">0</td></tr> <tr><td>$R_4, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">30</td></tr> <tr><td>$X_{L1}, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">10</td></tr> <tr><td>$X_{L2}, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">20</td></tr> <tr><td>$X_{L3}, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">30</td></tr> <tr><td>$X_{C1}, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">5</td></tr> <tr><td>$X_{C2}, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">10</td></tr> </table>	$\underline{E}, \text{ В}$	$360 \angle 270^\circ$	$R_1, \text{ Ом}$	0	$R_2, \text{ Ом}$	20	$R_3, \text{ Ом}$	0	$R_4, \text{ Ом}$	30	$X_{L1}, \text{ Ом}$	10	$X_{L2}, \text{ Ом}$	20	$X_{L3}, \text{ Ом}$	30	$X_{C1}, \text{ Ом}$	5	$X_{C2}, \text{ Ом}$	10
$\underline{E}, \text{ В}$	$360 \angle 270^\circ$																				
$R_1, \text{ Ом}$	0																				
$R_2, \text{ Ом}$	20																				
$R_3, \text{ Ом}$	0																				
$R_4, \text{ Ом}$	30																				
$X_{L1}, \text{ Ом}$	10																				
$X_{L2}, \text{ Ом}$	20																				
$X_{L3}, \text{ Ом}$	30																				
$X_{C1}, \text{ Ом}$	5																				
$X_{C2}, \text{ Ом}$	10																				
 <p style="text-align: center;">Рисунок 1</p>	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="width: 50%;">$\underline{E}, \text{ В}$</td><td style="width: 50%; text-align: right;">$370 \angle 280^\circ$</td></tr> <tr><td>$R_1, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">10</td></tr> <tr><td>$R_2, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">0</td></tr> <tr><td>$R_3, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">0</td></tr> <tr><td>$R_4, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">30</td></tr> <tr><td>$X_{L1}, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">10</td></tr> <tr><td>$X_{L2}, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">20</td></tr> <tr><td>$X_{L3}, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">30</td></tr> <tr><td>$X_{C1}, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">5</td></tr> <tr><td>$X_{C2}, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">10</td></tr> </table>	$\underline{E}, \text{ В}$	$370 \angle 280^\circ$	$R_1, \text{ Ом}$	10	$R_2, \text{ Ом}$	0	$R_3, \text{ Ом}$	0	$R_4, \text{ Ом}$	30	$X_{L1}, \text{ Ом}$	10	$X_{L2}, \text{ Ом}$	20	$X_{L3}, \text{ Ом}$	30	$X_{C1}, \text{ Ом}$	5	$X_{C2}, \text{ Ом}$	10
$\underline{E}, \text{ В}$	$370 \angle 280^\circ$																				
$R_1, \text{ Ом}$	10																				
$R_2, \text{ Ом}$	0																				
$R_3, \text{ Ом}$	0																				
$R_4, \text{ Ом}$	30																				
$X_{L1}, \text{ Ом}$	10																				
$X_{L2}, \text{ Ом}$	20																				
$X_{L3}, \text{ Ом}$	30																				
$X_{C1}, \text{ Ом}$	5																				
$X_{C2}, \text{ Ом}$	10																				
<p style="text-align: center;">Варіант №28</p> <p>Завдання:</p> <p>1. Знайти комплексні опори Т- подібної схеми заміщення.</p>	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="width: 50%;">$\underline{E}, \text{ В}$</td><td style="width: 50%; text-align: right;">$370 \angle 280^\circ$</td></tr> <tr><td>$R_1, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">10</td></tr> <tr><td>$R_2, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">0</td></tr> </table>	$\underline{E}, \text{ В}$	$370 \angle 280^\circ$	$R_1, \text{ Ом}$	10	$R_2, \text{ Ом}$	0														
$\underline{E}, \text{ В}$	$370 \angle 280^\circ$																				
$R_1, \text{ Ом}$	10																				
$R_2, \text{ Ом}$	0																				

 <p style="text-align: center;">Рисунок 1</p>	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="width: 50%;">$R_3, \text{ Ом}$</td><td style="width: 50%; text-align: right;">30</td></tr> <tr><td>$R_4, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">30</td></tr> <tr><td>$X_{L1}, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">10</td></tr> <tr><td>$X_{L2}, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">0</td></tr> <tr><td>$X_{L3}, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">30</td></tr> <tr><td>$X_{C1}, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">5</td></tr> <tr><td>$X_{C2}, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">10</td></tr> </table>	$R_3, \text{ Ом}$	30	$R_4, \text{ Ом}$	30	$X_{L1}, \text{ Ом}$	10	$X_{L2}, \text{ Ом}$	0	$X_{L3}, \text{ Ом}$	30	$X_{C1}, \text{ Ом}$	5	$X_{C2}, \text{ Ом}$	10						
$R_3, \text{ Ом}$	30																				
$R_4, \text{ Ом}$	30																				
$X_{L1}, \text{ Ом}$	10																				
$X_{L2}, \text{ Ом}$	0																				
$X_{L3}, \text{ Ом}$	30																				
$X_{C1}, \text{ Ом}$	5																				
$X_{C2}, \text{ Ом}$	10																				
<p style="text-align: center;">Варіант №29</p> <p>Завдання:</p> <p>1. Знайти комплексні опори П- подібної схеми заміщення.</p>	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="width: 50%;">$\underline{E}, \text{ В}$</td><td style="width: 50%; text-align: right;">$380 \angle 290^\circ$</td></tr> <tr><td>$R_1, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">10</td></tr> <tr><td>$R_2, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">20</td></tr> <tr><td>$R_3, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">0</td></tr> <tr><td>$R_4, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">0</td></tr> <tr><td>$X_{L1}, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">0</td></tr> <tr><td>$X_{L2}, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">20</td></tr> <tr><td>$X_{L3}, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">30</td></tr> <tr><td>$X_{C1}, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">5</td></tr> <tr><td>$X_{C2}, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">10</td></tr> </table>	$\underline{E}, \text{ В}$	$380 \angle 290^\circ$	$R_1, \text{ Ом}$	10	$R_2, \text{ Ом}$	20	$R_3, \text{ Ом}$	0	$R_4, \text{ Ом}$	0	$X_{L1}, \text{ Ом}$	0	$X_{L2}, \text{ Ом}$	20	$X_{L3}, \text{ Ом}$	30	$X_{C1}, \text{ Ом}$	5	$X_{C2}, \text{ Ом}$	10
$\underline{E}, \text{ В}$	$380 \angle 290^\circ$																				
$R_1, \text{ Ом}$	10																				
$R_2, \text{ Ом}$	20																				
$R_3, \text{ Ом}$	0																				
$R_4, \text{ Ом}$	0																				
$X_{L1}, \text{ Ом}$	0																				
$X_{L2}, \text{ Ом}$	20																				
$X_{L3}, \text{ Ом}$	30																				
$X_{C1}, \text{ Ом}$	5																				
$X_{C2}, \text{ Ом}$	10																				
 <p style="text-align: center;">Рисунок 1</p>	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="width: 50%;">$\underline{E}, \text{ В}$</td><td style="width: 50%; text-align: right;">$390 \angle 300^\circ$</td></tr> <tr><td>$R_1, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">10</td></tr> <tr><td>$R_2, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">20</td></tr> </table>	$\underline{E}, \text{ В}$	$390 \angle 300^\circ$	$R_1, \text{ Ом}$	10	$R_2, \text{ Ом}$	20														
$\underline{E}, \text{ В}$	$390 \angle 300^\circ$																				
$R_1, \text{ Ом}$	10																				
$R_2, \text{ Ом}$	20																				
<p style="text-align: center;">Варіант №30</p> <p>Завдання:</p> <p>1. Знайти комплексні опори Т- подібної схеми заміщення.</p>	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="width: 50%;">$\underline{E}, \text{ В}$</td><td style="width: 50%; text-align: right;">$390 \angle 300^\circ$</td></tr> <tr><td>$R_1, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">10</td></tr> <tr><td>$R_2, \text{ Ом}$</td><td style="text-align: right;">20</td></tr> </table>	$\underline{E}, \text{ В}$	$390 \angle 300^\circ$	$R_1, \text{ Ом}$	10	$R_2, \text{ Ом}$	20														
$\underline{E}, \text{ В}$	$390 \angle 300^\circ$																				
$R_1, \text{ Ом}$	10																				
$R_2, \text{ Ом}$	20																				



Розділ 2

РОЗРАХУНОК ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ В ЛІНІЙНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ КОЛАХ

Практичне заняття №5 Розрахунок перехідного процесу в колі з одним накопичувачем енергії при дії постійних джерел енергії

Розрахунок усталених режимів до і після комутації. Складання характеристичного рівняння кола та визначення його коренів. Розрахунок початкових умов для струмів і напруг. Знаходження розв'язків для вільних складових струмів і напруг та загальних розв'язків. Побудова часових діаграм перехідних струмів і напруг.

Класичний метод

Додаткова література (Самойленко А.М. Диференційні рівняння: Підручник / А.М. Самойленко, М.О. Перестюк, І.О. Парасюк.- 2-ге вид., перероб. і доп. – К.: Либідь, 2003 – 600 с.)

Класичний метод рішення задач на перехідні процеси складається з:

1. Складання рівнянь по законам Кірхгофа для миттєвих значень струмів та напруг

$$e_L = -L \frac{di}{dt}, u_C = \frac{1}{C} \int_0^t i dt, i_C = C \frac{du_C}{dt}. \quad (5.1.1)$$

2. Рішення рівнянь Кірхгофа.

3. Загальне рішення отриманого неоднорідного лінійного диференціального рівняння:

$$\begin{aligned}
 i_L(t) &= i_{\text{примусова складова}} + i_{\text{вільна складова}} = \\
 &= i_{\text{уст. режим після ком.}} + A \cdot e^{pt} \text{ (A)}; \\
 u_C(t) &= u_{\text{примусова складова}} + u_{\text{вільна складова}} = \\
 &= u_{\text{уст. режим після ком.}} + B \cdot e^{pt} \text{ (В)}.
 \end{aligned}
 \tag{5.1.2}$$

4. Розрахунку вільної складової $A \cdot e^{pt}$.
5. Визначення початкових умов із законів комутації.
6. Складання та розв'язку характеристичного рівняння.

Задача 1

Електричне коло, що наведене на рис. 5.1.1, має наступні параметри: $R_1=10$ (Ом), $R_2=5$ (Ом), $R_3=30$ (Ом), $L_1=2$ (Гн) та $E_1=30$ (В).

Визначити після замикання ключа Q закони зміни у часі всіх струмів та напруги на паралельній ділянці [1].

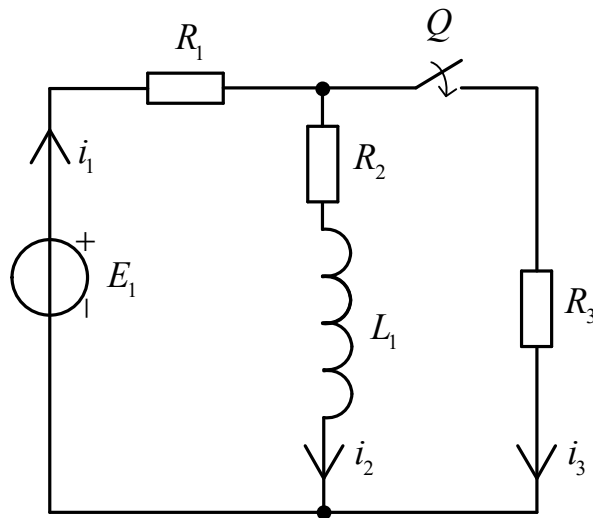


Рисунок 5.1.1 – Електрична схема до комутації

Рішення

Розрахунок усталених режимів до та після комутації. У якості незалежних початкових умов використовують величини струмів $i_L(0_-)$, що проходять через кожен індуктивну котушку, та напруги на ємностях $u_C(0_-)$, до моменту комутації.

Розрахунок ustalених режимів до комутації (УРДК) (рис. 5.1.1):

$$\begin{aligned}i_1(0_-) &= \frac{E_1}{R_1 + R_2} = \frac{30}{10 + 5} = 2(\text{A}); \\i_2(0_-) &= i_1(0_-) = 2(\text{A}); \\i_3(0_-) &= 0; \\ \omega &= 2 \cdot \pi \cdot f = 2 \cdot \pi \cdot 0 = 0; \\ \underline{U}_{L_1}(0_-) &= \underline{I}_2(0_-) \cdot jX_{L_1} = \underline{I}_2(0_-) \cdot j\omega \cdot L_1 = \\ &= \underline{I}_2(0_-) \cdot j \cdot 0 \cdot L_1 = 0; \\ \boxed{u_{L_1}(0_-) = 0}.\end{aligned} \tag{5.1.1}$$

Розрахунок ustalених режимів після комутації (УРПК) (5.1.2):

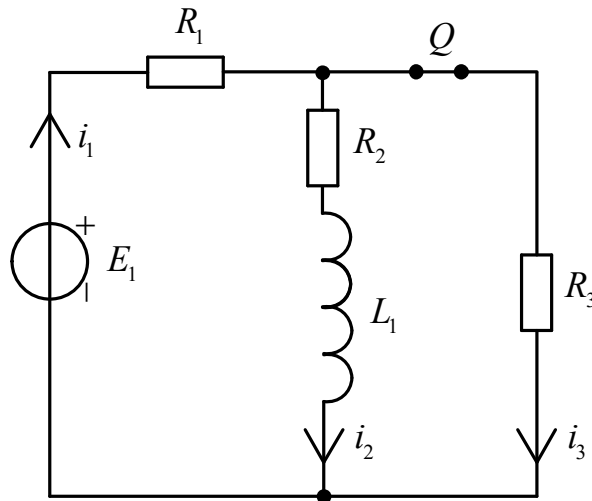


Рисунок 5.1.2 – Електрична схема після комутації

$$\begin{aligned}i_1' &= \frac{E_1}{R_1 + \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3}} = \frac{30}{10 + \frac{5 \cdot 30}{5 + 30}} = 2.1(\text{A}); \\i_2' &= i_1' \frac{R_3}{R_2 + R_3} = 2.1 \frac{30}{5 + 30} = 1.8(\text{A}); \\i_3' &= i_1' - i_2' = 2.1 - 1.8 = 0.3(\text{A}); \\ \boxed{u'_{L_1} = 0}.\end{aligned} \tag{5.1.2}$$

Складання характеристичного рівняння та визначення його коренів

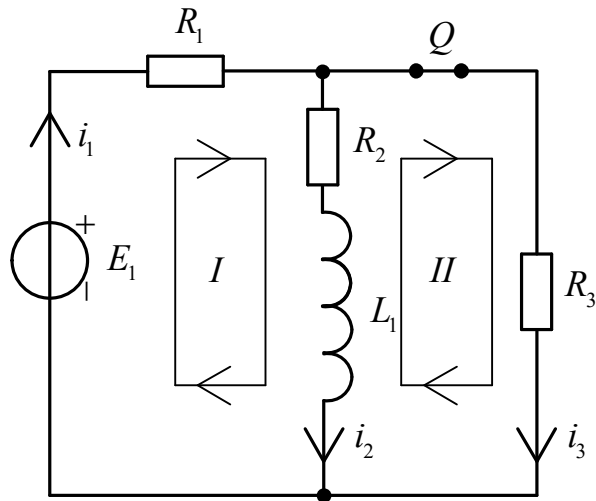


Рисунок 5.1.3 – Електрична схема

На основі законів Кірхгофа запишемо систему (рис. (5.1.3))

$$\begin{cases} i_1 = i_2 + i_3; \\ R_1 \cdot i_1 + R_2 \cdot i_2 + L_1 \frac{di_2}{dt} = E_1; \\ R_2 \cdot i_2 + L_1 \frac{di_2}{dt} = R_3 \cdot i_3. \end{cases} \quad (5.1.3)$$

Підставив у друге рівняння системи (5.1.3) значення i_1 з першого та i_3 з третього, після простих перетворень отримаємо

$$R_1 i_1 + R_2 i_2 + L_1 \frac{di_2}{dt} = E_1;$$

$$R_1 (i_2 + i_3) + R_2 i_2 + L_1 \frac{di_2}{dt} = E_1;$$

$$R_1 i_2 + R_1 i_3 + R_2 i_2 + L_1 \frac{di_2}{dt} = E_1;$$

$$(R_1 + R_2) i_2 + R_1 \cdot \frac{1}{R_3} (R_2 \cdot i_2 + L_1 \frac{di_2}{dt}) + L_1 \frac{di_2}{dt} = E_1;$$

$$(R_1 + R_2) i_2 + R_1 \cdot \frac{1}{R_3} (R_2 \cdot i_2 + L_1 \frac{di_2}{dt}) + L_1 \frac{di_2}{dt} = E_1 \cdot R_3;$$

$$R_3 (R_1 + R_2) i_2 + R_1 R_2 i_2 + R_1 L_1 \frac{di_2}{dt} + R_3 L_1 \frac{di_2}{dt} = R_3 E_1;$$

$$\begin{aligned}
\frac{di_2}{dt}(R_1L_1 + R_3L_1) + i_2(R_3(R_1 + R_2) + R_1R_2) &= R_3E_1; \\
\frac{di_2}{dt} + i_2 \frac{(R_3(R_1 + R_2) + R_1R_2)}{(R_1L_1 + R_3L_1)} &= \frac{R_3E_1}{(R_1L_1 + R_3L_1)}; \\
\frac{di_2}{dt} + i_2 \frac{R_1R_2 + R_1R_3 + R_2R_3}{L_1(R_1 + R_3)} i_2 &= \frac{R_3E_1}{L_1(R_1 + R_3)}; \\
\frac{di_2}{dt} + i_2 \frac{10 \cdot 5 + 10 \cdot 30 + 5 \cdot 30}{2(10 + 30)} i_2 &= \frac{30 \cdot 30}{2(10 + 30)}; \\
\boxed{\frac{di_2}{dt} + 6.25i_2 = 11.25}. &
\end{aligned} \tag{5.1.4}$$

Характеристичне рівняння можна отримати, якщо записати у залежності від p вхідний опір кола $Z_{ab}(p) = 0$ для будь-якої з віток (рис. 5.1.4).

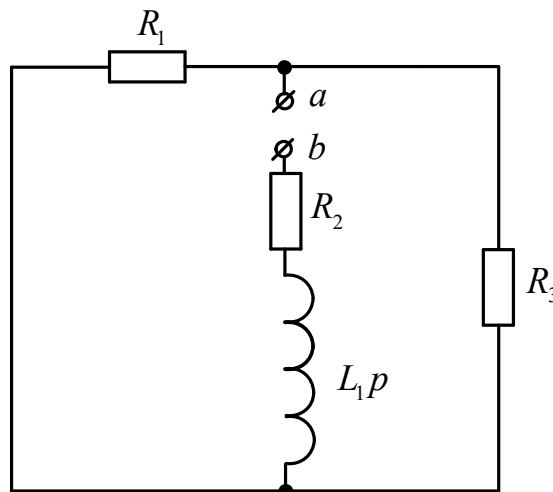


Рисунок 5.1.4 – Електрична схема у операторній формі після комутації

$$\begin{aligned}
Z_{ab}(p) &= L_1p + R_2 + \frac{R_1 \cdot R_3}{(R_1 + R_3)} = 0; \\
p &= \frac{-R_1 \cdot R_3 - R_2(R_1 + R_3)}{(R_1 + R_3) \cdot L_1} = \\
&= \frac{-10 \cdot 30 - 5(10 + 30)}{(10 + 30) \cdot 2} = -6.25(\text{с}^{-1}).
\end{aligned} \tag{5.1.5}$$

Знаходження розв'язків для вільних складових струмів та напруг.

Загальне рішення рівняння (5.1.4)

$$i_2 = i_2' + i_2'' = i_2' + A \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}; \quad (5.1.6)$$

$$\frac{di_2'}{dt} = 0 \Rightarrow i_2' = \frac{11.25}{6.25} = 1.8(\text{A}).$$

Вільна складова струму i_2 знаходиться як інтеграл рівняння (5.1.4), коли права частина рівняння дорівнює нулю

$$\frac{di_2''}{dt} + 6.25i_2'' = 0;$$

$$\frac{di_2''}{dt} = -6.25i_2'';$$

$$\frac{di_2''}{i_2''} = -6.25dt;$$

$$\int \frac{1}{i_2''} di_2'' = \int -6.25dt;$$

$$\ln(i_2'') = -6.25t + \ln(A);$$

$$e^{\ln i_2''} = e^{-6.25t + \ln(A)} = e^{-6.25t} \cdot e^{\ln A};$$

$$i_2''(t) = e^{-6.25t} \cdot A;$$

$$\boxed{i_2'' = A \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}};$$

$$di_2'' + 6.25i_2''dt = 0;$$

$$i_2'' + 6.25 \cdot i_2'' \cdot \tau = i_2''(1 + 6.25 \cdot \tau) = 0;$$

$$i_2'' = 0, (1 + 6.25 \cdot \tau) = 0;$$

$$\tau = \left| -\frac{1}{6.25} \right| = 0.16, (\text{с});$$

(5.1.7)

$$\underline{p + 6.25 = 0} \Rightarrow p = -6.25, (\text{с}^{-1}); \boxed{\tau = \frac{1}{|p|}}.$$

Підставив вимушену та вільну складові струму i_2 у рівняння (5.1.6), отримаємо

$$i_2 = 1.8 + Ae^{-6.25t}; \quad (5.1.8)$$

Сталу інтегрування A визначають з початкових умов

$$i_2(0_+) = i_2' + Ae^{-6.25t};$$

$$i_{2|t=0+} = i_2(0_-) = \frac{E_1}{R_1 + R_2} = 2, (A);$$

$$2 = 1.8 + Ae^{-6.25t} \Big|_{t=0} \Rightarrow$$

$$A = 2 - 1.8 = 0.2; \quad (5.1.9)$$

$$\boxed{i_2(t) = 1.8 + 0.2e^{-6.25t}} (A);$$

$$u_{L1}(t) = L_1 \frac{di_2}{dt} = 2 \cdot \frac{d(1.8 + 0.2e^{-6.25t})}{dt} =$$

$$= 2 \cdot 0.2 \cdot (-6.25)e^{-6.25t} = -2.5 \cdot e^{-6.25t}, (B).$$

Підставив i_2 у третє рівняння системи (5.1.3), знайдемо струм $i_3(t)$

$$i_3(t) = \frac{R_2}{R_3} i_2 + \frac{L_1}{R_3} \frac{di_2}{dt} = 0.3 - 0.05e^{-6.25t} (A). \quad (5.1.10)$$

Підставив значення струмів i_2 та i_3 у перше рівняння системи (5.1.3), отримаємо

$$\begin{aligned} i_1(t) &= i_2(t) + i_3(t) = 1.8 + 0.2e^{-6.25t} + 0.3 - 0.05e^{-6.25t} = \\ &= 2.1 + 0.15e^{-6.25t}, (A). \end{aligned} \quad (5.1.11)$$

Побудова часових графіків перехідних струмів і напруг.

Зобразимо залежність $i_2(t)$ та $u_{L1}(t)$ на рис. 4.1.1.5 значення, яких представлено у табл. 5.1.1.

Таблиця 5.1.1 – Значення функцій $i_2(t)$ та $u_{L1}(t)$

$t, \text{с}$	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
$i_2, \text{А}$	2	1.907	1.857	1.831	1.816	1.809	1.805	1.803	1.801	1.801	1.801
$u_{L1}, \text{В}$	-2.5	-1.338	-0.716	-0.383	-0.205	-0.11	-0.059	-0.031	-0.017	-0.009	0.0048

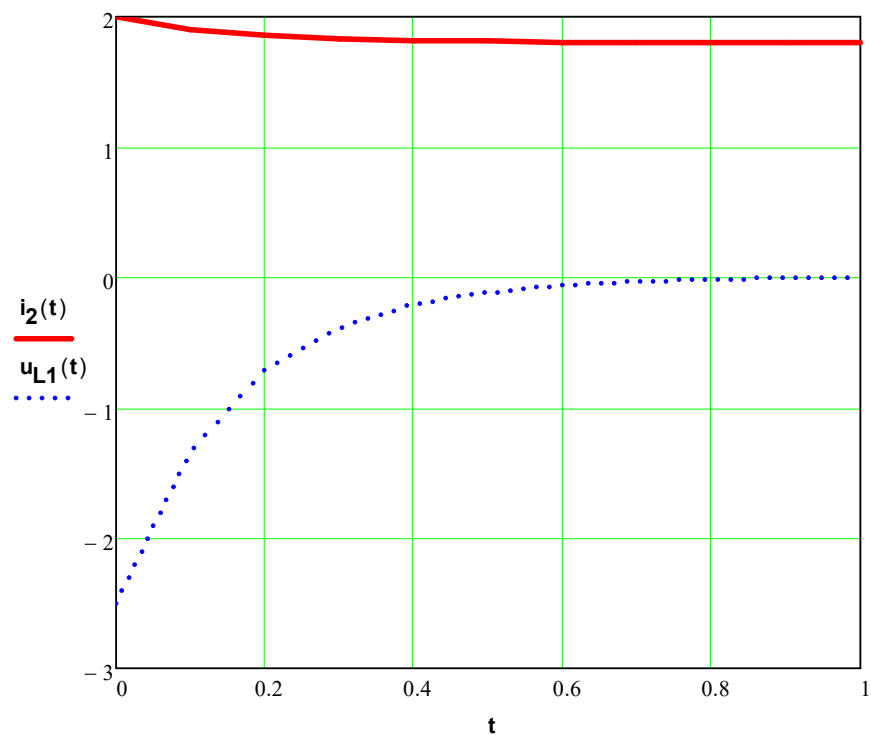


Рисунок 5.1.5 – Графіки перехідних процесів $i_2(t)$ та $u_{L1}(t)$

Задача 2

Електричне коло (рис. 5.2.1), параметри якого $R_1=5$ (Ом), $R_2=5$ (Ом), $R_3=10$ (Ом), $R_4=15$ (Ом) та $C_1=1$ (мкФ), при розімкненому ключі Q знаходиться в усталеному режимі під дією сталої ЕРС $E_1=15$ (В) [1].

Визначити після замикання ключа Q :

- 1) початкові значення перехідних струмів та напруг на конденсаторі;

- 2) початкові значення сталих та вільних складових напруги на конденсаторі у момент початку перехідного процесу;
- 3) закони зміни у часі усіх струмів та напруг на конденсаторі.

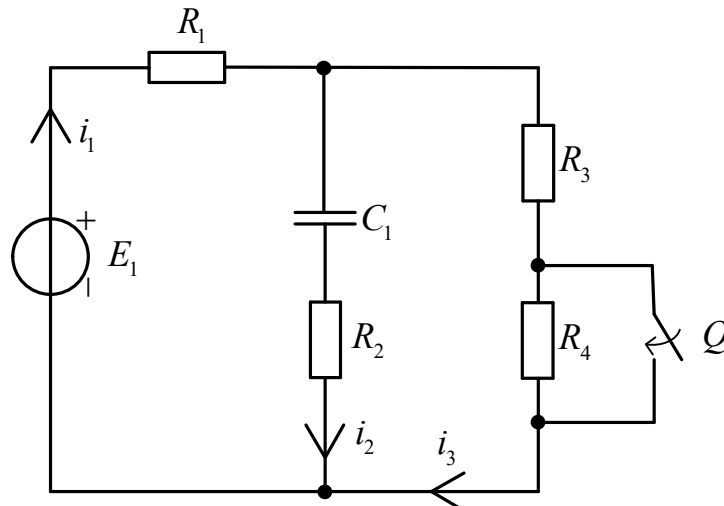


Рисунок 5.2.1 – Електрична схема до комутації

Рішення

1. **Розрахунок режиму до комутації.** Струми у вітках та напруга на конденсаторі дорівнюють:

$$i_1 = i_3 = \frac{E_1}{R_1 + R_3 + R_4} = \frac{15}{5 + 10 + 15} = 0.5(\text{A});$$

$$\boxed{i_2 = 0};$$

$$u_{C1}(0_-) = (R_3 + R_4) \cdot i_3 = (10 + 15) \cdot 0.5 = 12.5(\text{B}).$$
(5.2.1)

2. **Розрахунок усталеного режиму роботи після комутації** (ключ Q замкнутий (рис. 5.2.2)). Струми у вітках та напруга на конденсаторі дорівнюють:

$$i'_1 = i'_3 = \frac{E_1}{R_1 + R_3} = \frac{15}{5 + 10} = 1(\text{A});$$

$$\boxed{i'_2 = 0};$$

$$u'_{C1} = R_3 \cdot i'_3 = 10 \cdot 1 = 10(\text{B}).$$
(5.2.2)

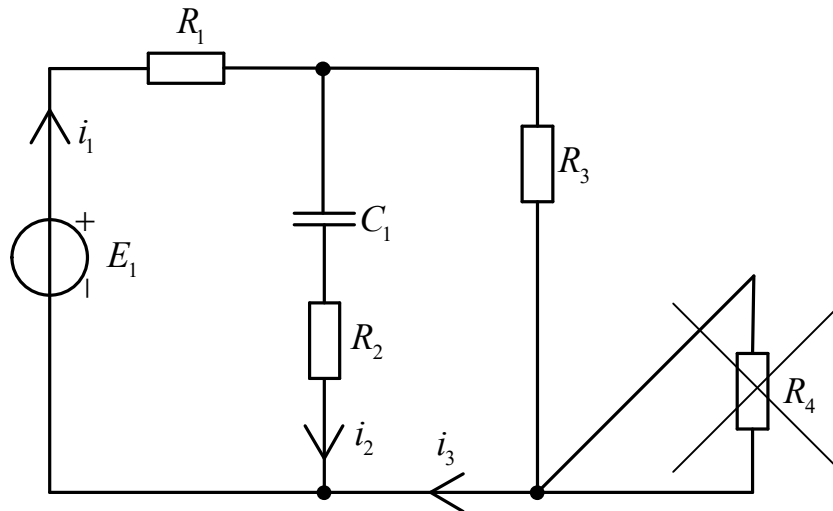


Рисунок 5.2.2 – Електрична схема після комутації

3. Розрахунок перехідних струмів та напруг на конденсаторі для моменту часу $t=0_+$. За законами Кірхгофа складаємо рівняння для схеми після комутації

$$\begin{cases} i_1 = i_2 + i_3; \\ R_1 \cdot i_1 + R_2 \cdot i_2 + u_{C1} = E_1; \\ R_3 \cdot i_3 = R_2 \cdot i_2 + u_{C1}. \end{cases} \quad (5.2.3)$$

За законом комутації напруга на конденсаторі не може змінюватись стрибком, тому

$$u_{C1}(0_+) = u_{C1}(0_-) = 12.5(\text{В}).$$

З рівнянь (1)-(3) системи (4.1.2.3) для моменту $t=0_+$ маємо

$$\begin{cases} i_1(0_+) = i_2(0_+) + i_3(0_+); \\ R_1 \cdot i_1(0_+) + R_2 \cdot i_2(0_+) + 12.5 = 15; \\ R_3 \cdot i_3(0_+) = R_2 \cdot i_2(0_+) + 12.5. \end{cases}$$

Розв'язуючи систему рівнянь, знаходимо значення струмів у момент початку перехідного процесу

$$i_1(0_+) = 0.8(\text{A}), i_2(0_+) = -0.3(\text{A}), i_3(0_+) = 1.1(\text{A}).$$

Розраховуємо початкові значення вільних складових струмів та напруги на конденсаторі. Для цього кожен перехідний струм та напругу на конденсаторі представимо у вигляді суми усталеної та вільної складових:

$$\begin{aligned} i_1(0_+) &= i_1'(0_+) + i_1''(0_+) \Big|_{t=0_+}; \\ A_1 &= i_1(0_+) - i_1'(0_+) = 0.8 - 1 = -0.2; \\ A_2 &= i_2(0_+) - i_2'(0_+) = -0.3 - 0 = -0.3; \\ A_3 &= i_3(0_+) - i_3'(0_+) = 1.1 - 1 = 0.1; \\ B &= u_{C1}(0_+) - u'_{C1}(0_+) = 12.5 - 10 = 2.5. \end{aligned} \quad (5.2.4)$$

Складемо характеристичне рівняння у вигляді характеристичного вхідного опору після комутації, яке прирівнюємо до нуля

$$\begin{aligned} Z(p) &= R_1 + \frac{R_3 \cdot (R_2 + \frac{1}{pC_1})}{R_3 + R_2 + \frac{1}{pC_1}} = \\ &= \frac{pC_1 \cdot (R_1 \cdot R_3 + R_1 \cdot R_2 + R_2 \cdot R_3) + R_1 + R_3}{pC_1 \cdot (R_3 + R_2) + 1} = 0 \end{aligned} \quad (5.2.5)$$

$$p = -\frac{R_1 + R_3}{C_1 \cdot (R_1 \cdot R_3 + R_1 \cdot R_2 + R_2 \cdot R_3)} = -12 \cdot 10^4 \text{ (с}^{-1}\text{);}$$

$$\tau = \frac{1}{|p|} = 8.3 \cdot 10^{-6} \text{ (с).}$$

Перехідні струми та напруга на конденсаторі:

$$\begin{aligned} i_1(t) &= i_1' + i_1'' = \frac{E_1}{R_1 + R_3} + A_1 e^{pt} = 1 - 0.2e^{-12 \cdot 10^4 t} \text{ (A);} \\ i_2(t) &= i_2' + i_2'' = 0 + A_2 e^{pt} = -0.3e^{-12 \cdot 10^4 t} \text{ (A);} \\ i_3(t) &= i_3' + i_3'' = \frac{E}{R_1 + R_3} + A_3 e^{pt} = 1 + 0.1e^{-12 \cdot 10^4 t} \text{ (A);} \\ u_{C1}(t) &= u'_{C1} + u''_{C1} = R_3 \cdot i_3' + B e^{pt} = 10 + 2.5e^{-12 \cdot 10^4 t} \text{ (В).} \end{aligned} \quad (5.2.6)$$

Побудова часових графіків перехідних струмів і напруг. Зобразимо залежність $i_2(t)$ та $u_{C1}(t)$ на рис. 5.2.3.

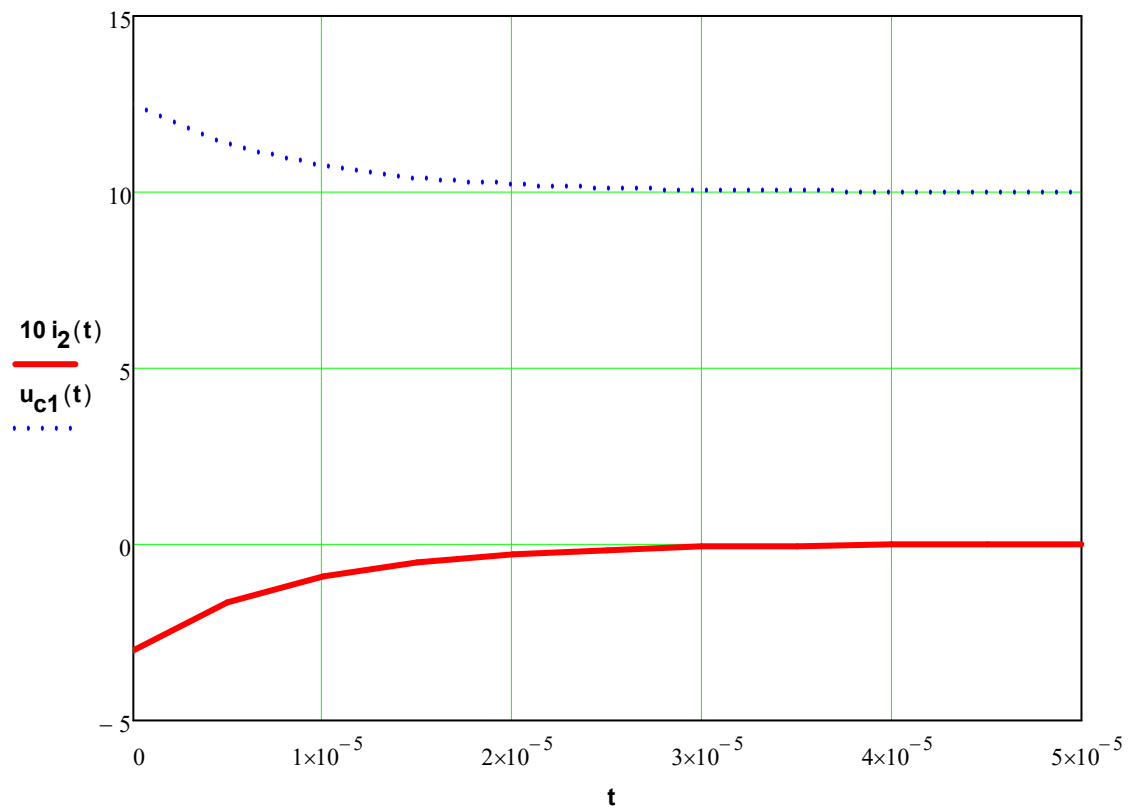


Рисунок 5.2.3 – Графіки перехідних процесів $i_2(t)$ та $u_{C1}(t)$

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Курило І.А. Розрахунок перехідних процесів у лінійних електричних колах : навч. посіб. / І.А. Курило, В.П. Грудська, Л.Ю. Спінул, М.А. Щерба.- К.: НТУУ “КПІ”, 2013.-289 с.

Завдання для самостійного розрахунку перехідних процесів в електричних колах з зосередженими параметрами класичний метод

Непарні варіанти (за списком групи) виконують першу задачу, а парні другу. Параметри електричного кола:

$$A = \begin{cases} 10, & \text{для ЕД-;} \\ 20, & \text{для ЕВ-;} \\ 30, & \text{для ЕТ-,} \end{cases} \quad N = \text{номер у списку.}$$

$$E_1 = A + N \text{ (В)}, \quad E_2 = A + N + 10 \text{ (В)}, \quad R = A + N + 1 \text{ (Ом)}, \quad R_1 = A + N + 2 \text{ (Ом)}, \\ R_2 = A + N + 3 \text{ (Ом)}, \quad R_3 = A + N + 4 \text{ (Ом)}, \quad R_4 = A + N + 5 \text{ (Ом)}, \quad C_1 = A + N + 100 \text{ (мкФ)}, \\ L_1 = A + N + 200 \text{ (мГн)}.$$

Варіант №1

Завдання:

1. Визначити закони зміни у часі усіх струмів та напруги на конденсаторі після розмикання ключа Q .

2. Побудувати графіки перехідних процесів координат електричного кола (струмів та напруг $t_{\text{III}} = 5\tau$) в залежності від сталої часу τ .

- E_1 , В
- E_2 , В
- R_1 , Ом
- R_2 , Ом
- R_3 , Ом
- C_1 , мкФ

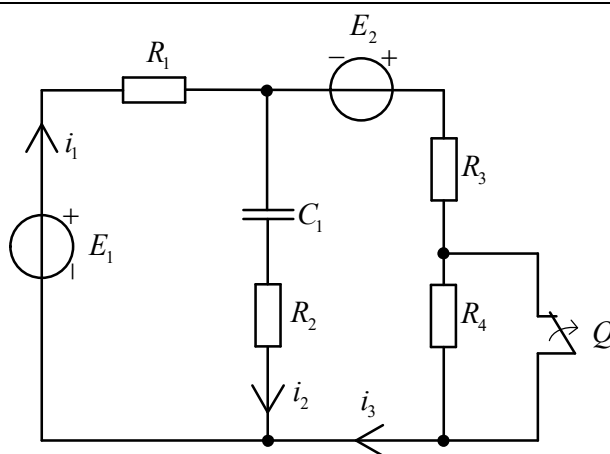


Рисунок 1

Варіант №2

Завдання:

1. Визначити закони зміни у часі усіх струмів та напруги на паралельній ділянці **після замикання** ключа Q .

2. Побудувати графіки перехідних процесів координат електричного кола (струмів та напруг $t_{\text{III}} = 5\tau$) в залежності від сталої часу τ .

$E_1, \text{В}$

$E_2, \text{В}$

$R, \text{Ом}$

$R_1, \text{Ом}$

$R_2, \text{Ом}$

$L_1, \text{мГн}$

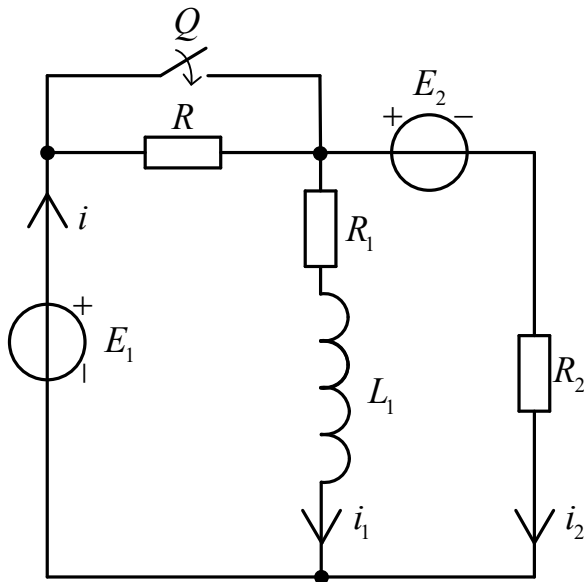


Рисунок 1

Практика №6 Розрахунок перехідного процесу в колі з одним накопичувачем енергії при одночасній дії постійного джерела і джерела синусоїдного струму

Розрахунок усталених режимів до та після комутації. Складання характеристичного рівняння кола та визначення його коренів. Особливості розрахунку усталених режимів до та після комутації при одночасній дії кількох джерел з різними часовими характеристиками. Розрахунок початкових умов та знаходження розв'язків для вільних складових струмів і напруг. Складання загальних розв'язків для перехідних струмів і напруг.

Задача 1

Розрахувати закони зміни у часі струмів та напруги на котушці індуктивності після замикання ключа Q [1].

Електричне коло на рис. 6.1.1 має наступні параметри: $R_1=10$ (Ом), $R_{11}=10$ (Ом), $R_2=10$ (Ом), $R_3=10$ (Ом), $L_1=0.1$ (Гн), $E_1=100$ (В) та $e_2 = 50\sin(200t + 30^\circ)$ (В).

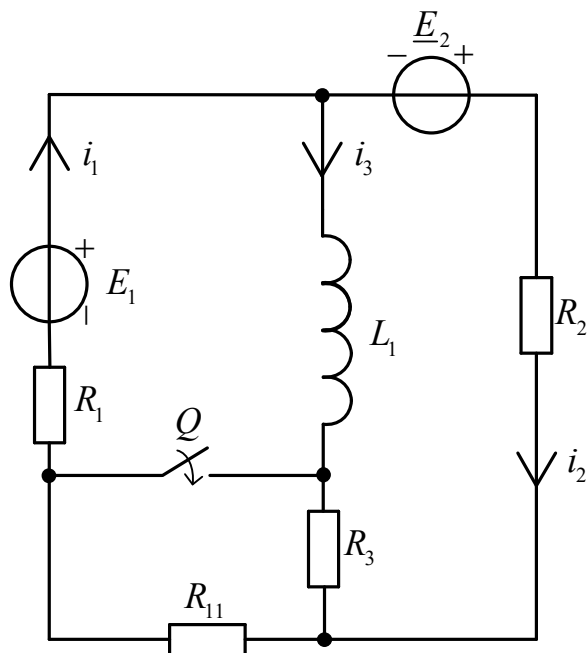


Рисунок 6.1.1 – Електрична схема

Рішення

Розрахунок ustalених режимів до комутації.

Розглянемо вплив окремого джерела ЕРС на електричне коло. Джерело постійної ЕРС (рис. 6.1.2, а) та джерело змінної ЕРС (рис. 6.1.2, б)

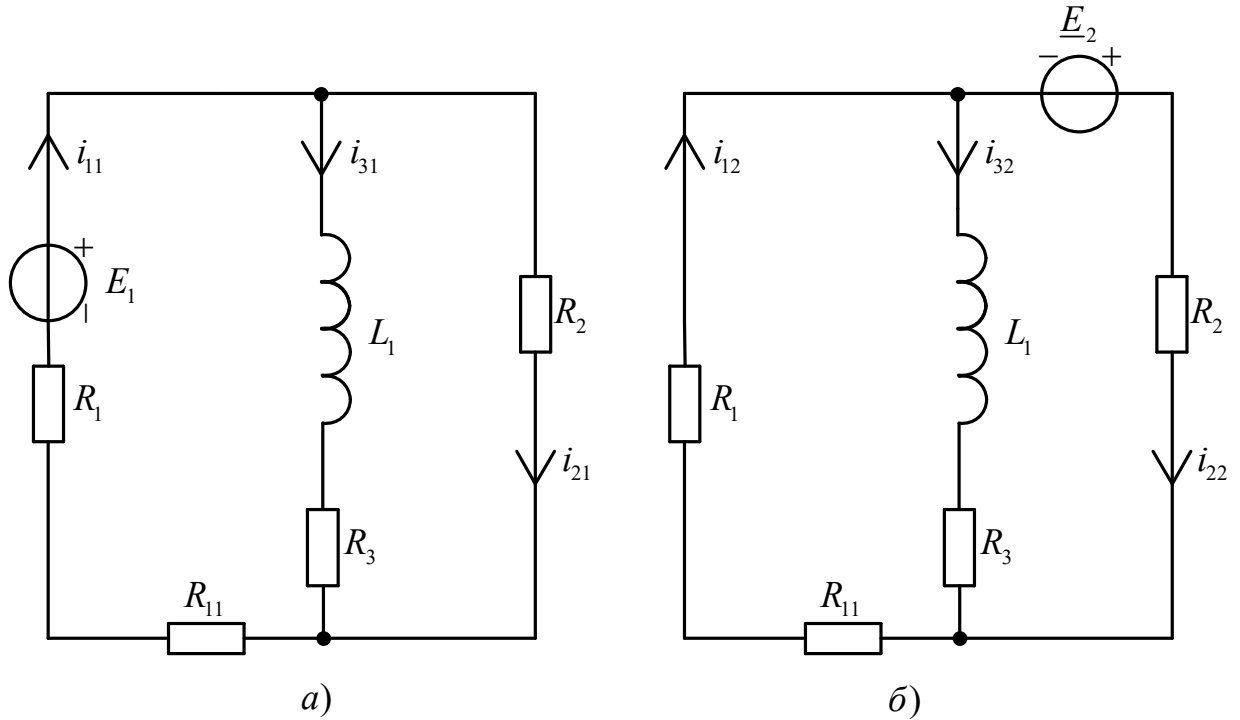


Рисунок 6.1.2 – Електрична схема при на неї дії різних джерел ЕРС

Розрахуємо ustalений режим до комутації (УРДК).

Нехай у колі діє тільки E_1

$$\begin{aligned}
 R_e &= R_1 + R_{11} + \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3} = 25(\text{Ом}); \\
 I_{11} &= \frac{E_1}{R_e} = 4(\text{А}); \\
 I_{21} &= I_{11} \cdot \frac{R_3}{R_2 + R_3} = 2(\text{А}); \\
 I_{31} &= I_{11} - I_{21} = 2(\text{А}).
 \end{aligned}
 \tag{6.1.1}$$

Якщо у електричному колі діє тільки e_2

$$R_4 = R_1 + R_{11} = 10 + 10 = 20(\text{Ом});$$

$$X_L = \omega \cdot L_1 = 200 \cdot 0.1 = 20(\text{Ом});$$

$$\underline{Z}_e = R_2 + \frac{R_4 \cdot (R_3 + jX_L)}{R_4 + (R_3 + jX_L)} = 20.769 + j6.154 = 21.662 \angle 16.504^\circ (\text{Ом});$$

$$\underline{I}_{22} = \frac{\underline{E}_2}{\underline{Z}_e} = 2.244 + j \cdot 0.539 = 2.308 \angle 13.496^\circ (\text{А});$$

$$\underline{I}_{32} = \underline{I}_{22} \cdot \frac{R_4}{R_4 + (R_3 + jX_L)} = 1.202 - j \cdot 0.442 = 1.28 \angle -20.194^\circ (\text{А}); \quad (6.1.2)$$

$$\underline{I}_{12} = \underline{I}_{22} - \underline{I}_{32} = 1.043 + j0.981 = 1.431 \angle 43.241^\circ (\text{А}).$$

Визначимо значення струму, що проходить через котушку

$$i_3 = \underline{I}_{31} - \underline{I}_{32} \cdot \sin(\omega t - 20.194^\circ) = -1.28 \cdot \sin(200t - 20.194^\circ) + 2 (\text{А});$$

$$t = 0;$$

$$i_{30} = \underline{I}_{31} - \underline{I}_{32} \cdot \sin(\omega \cdot 0 - 20.194^\circ) = 2.442 (\text{А}).$$

(6.1.3)

Вільний режим (ВП).

Характеристичне рівняння можна отримати, якщо записати у залежності від p (оператор Лапласа) вхідний опір кола $Z_{ab}(p) = 0$ для будь-якої з віток (рис. 4.2.1.3).

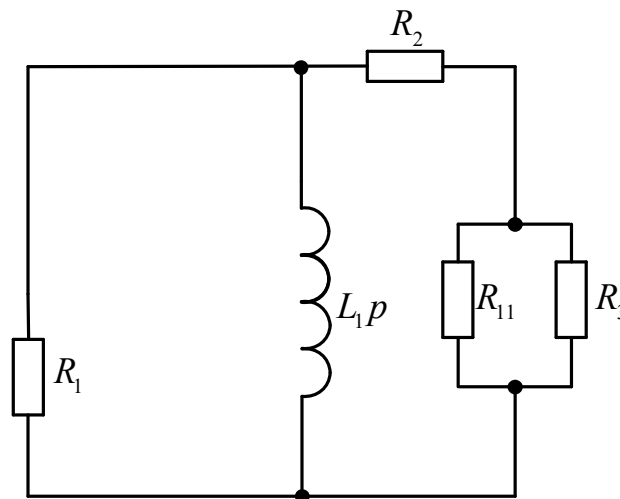


Рисунок 6.1.3 – Електрична схема в операторній формі після комутації (без джерел напруги)

$$R_5 = R_2 + \frac{R_{11} \cdot R_3}{R_{11} + R_3} = 15(\text{Ом});$$

$$p \cdot L_1 + \frac{R_1 \cdot R_5}{R_1 + R_5} = 0;$$

$$p = -\frac{R_1 \cdot R_5}{R_1 + R_5} \cdot \frac{1}{L_1} = -60(\text{с}^{-1}).$$
(6.1.4)

Розрахунок усталених режимів після комутації (УРПК). На рис. 6.1.4 представлені схеми після замикання ключа Q .

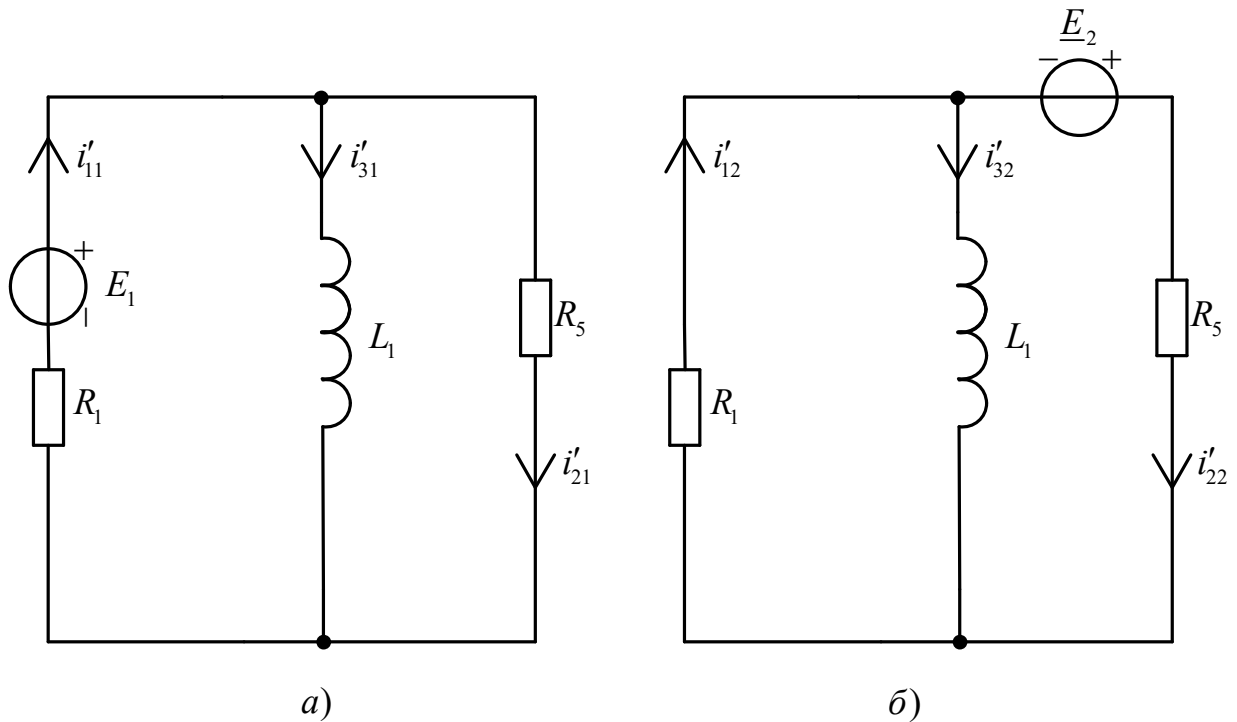


Рисунок 6.1.4 – Електрична схема

У колі діє тільки E_1

$$I'_{11} = \frac{E_1}{R_1} = 10(\text{А});$$

$$I'_{21} = 0;$$

$$I'_{31} = I'_{11} = 10(\text{А}).$$
(6.1.5)

У колі діє тільки e_2

$$\underline{Z}_e = R_5 + \frac{R_1 \cdot jX_L}{R_1 + jX_L} = 23 + j4 = 23.345 \angle 9.866^\circ (\text{Ом});$$

$$\underline{I}'_{22} = \frac{\underline{E}_2}{\underline{Z}_e} = 2.011 + j \cdot 0.737 = 2.142 \angle 20.134^\circ (\text{А});$$

$$\underline{I}'_{32} = \underline{I}'_{22} \cdot \frac{R_1}{R_1 + j \cdot X_L} = 0.697 - j \cdot 0.657 = 0.958 \angle -43.301^\circ (\text{А});$$

$$\underline{I}'_{12} = \underline{I}'_{22} - \underline{I}'_{32} = 1.314 + j \cdot 1.394 = 1.916 \angle 46.699^\circ (\text{А}); \quad (6.1.6)$$

$$\underline{U}_L = -R_1 \cdot \underline{I}'_{12} = -10 \cdot 1.916 \angle 46.699^\circ = -(13.138 + j \cdot 13.941) =$$

$$= -19.16 \angle 46.699^\circ (\text{В}).$$

Знайдемо струми та напругу на котушці в усталеному режимі ($t \rightarrow \infty$):

$$i'_1 = \boxed{I'_{11}} + I_{12} \cdot \sin(\omega t + 46.699^\circ) =$$

$$= \boxed{10} + 1.916 \cdot \sin(200t + 46.699^\circ) (\text{А});$$

$$i'_2 = I'_{21} + I_{22} \cdot \sin(\omega t + 20.194^\circ) =$$

$$= 2.142 \cdot \sin(200t + 20.194^\circ) (\text{А});$$

$$i'_3 = \underline{I}_{31} - \underline{I}_{32} \cdot \sin(\omega t - 43.301^\circ) =$$

$$= -0.958 \cdot \sin(200t - 43.301^\circ) + 10 (\text{А}); \quad (6.1.7)$$

$$u'_L = R_1 \cdot I_{12} \cdot \sin(\omega t + 46.699^\circ) =$$

$$= -19.157 \cdot \sin(200t + 46.699^\circ) (\text{В}).$$

Визначимо залежні початкові умови (ЗПУ) (рис. 6.1.5).

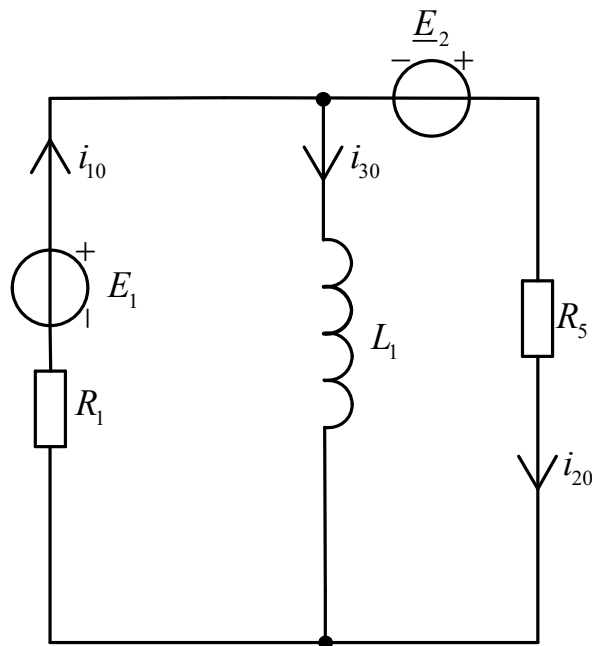


Рисунок 6.1.5 – Електрична схема

$$\begin{cases} i_{10} - i_{20} - i_{30} = 0; \\ i_{10} \cdot R_1 + U_{L0} = E_1; \\ i_{20} \cdot R_5 - U_{L0} = 50 \cdot \sin(200 \cdot 0 + 30^\circ); \end{cases} \quad (6.1.8)$$

$$i_{10} = 6.465 \text{ (A);}$$

$$i_{20} = 4.023 \text{ (A);}$$

$$U_{L0} = 35.348 \text{ (В).}$$

Визначимо значення сталих інтегрування для струмів та напруги:

$$\begin{aligned} A_1 &= i_{10} - (I'_{11} + I_{12} \cdot \sin(46.699^\circ)) = -4.929; \\ A_2 &= i_{20} - (I'_{21} + I_{22} \cdot \sin(20.194^\circ)) = 3.286; \\ A_3 &= i_{30} - (I'_{31} - I_{32} \cdot \sin(-43.301^\circ)) = -8.215; \\ A_4 &= U_{L0} - (-19.157 \cdot \sin(46.699^\circ)) = 49.29. \end{aligned} \quad (6.1.9)$$

Запишемо закони зміни струмів та напруги на котушці індуктивності:

$$\begin{aligned} i_1 &= i'_1 + A_1 \cdot e^{p \cdot t} = 1.916 \cdot \sin(200t + 46.699^\circ) - 4.929 \cdot e^{-60t} + 10 \text{ (A);} \\ i_2 &= i'_2 + A_2 \cdot e^{p \cdot t} = 2.142 \cdot \sin(200t + 20.194^\circ) + 3.286 \cdot e^{-60t} \text{ (A);} \\ i_3 &= i'_3 + A_3 \cdot e^{p \cdot t} = -0.958 \cdot \sin(200t - 43.301^\circ) - 8.215 \cdot e^{-60t} + 10 \text{ (A);} \\ u_L &= u'_L + A_4 \cdot e^{p \cdot t} = -19.157 \cdot \sin(200t + 46.699^\circ) + 49.29 \cdot e^{-60t} \text{ (В).} \end{aligned} \quad (6.1.10)$$

На рис. 6.1.6 наведено графік перехідного процесу напруги на котушці.

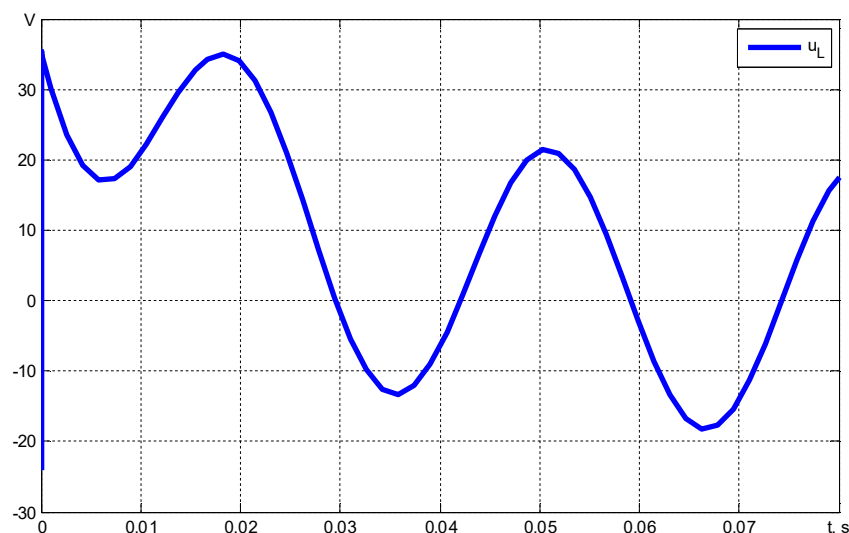


Рисунок 6.1.6 – Миттєве значення напруги

Графіки зміни електричних координат запропонованої схеми представлено на рис. 6.1.7.

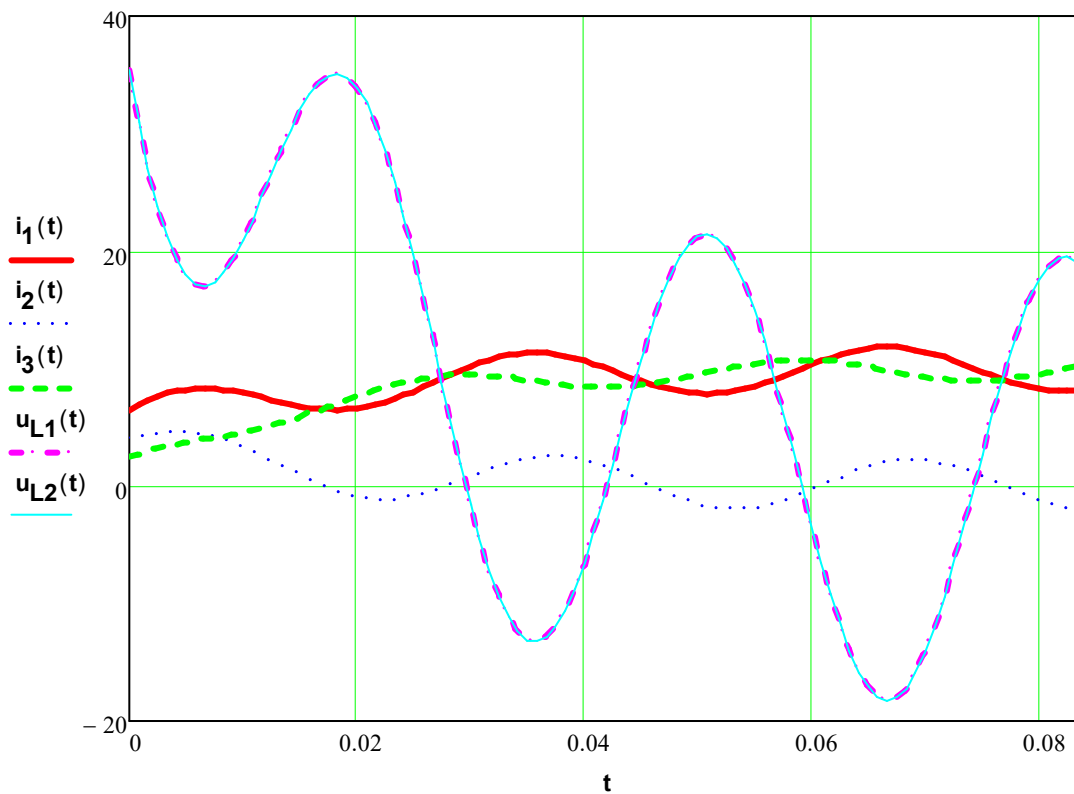


Рисунок 6.1.7 – Електричні координати досліджуваного кола

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Корощенко О.В. «Теоретичні основи електротехніки. Збірник задач: навчальний посібник» / укл. О.В. Корощенко, В.Ф. Денник, О.А. Журавель та ін.; за заг.ред. О.В.Корощенко.- Донецьк, ДВНЗ «ДонНТУ», 2012.- 673 с.

**Завдання для самостійного розрахунку перехідних процесів в
електричних кола з одним накопичувачем енергії при одночасній дії
постійного джерела і джерела синусоїдного струму класичним
методом**

Задача №6.П

Параметри електричного кола:

$$A = \begin{cases} 10, & \text{для ЕД-;} \\ 20, & \text{для ЕВ-;} \quad N=\text{номер у списку.} \\ 30, & \text{для ЕТ-} \end{cases}$$

$$E_1 = 100 + A + N \quad (\text{В}), \quad E_2 = A + N + 10 \quad (\text{В}), \quad R_1 = A + N + 10 \quad (\text{Ом}),$$

$$R_{11} = A + N + 20 (\text{Ом}), \quad R_2 = A + N + 30 \quad (\text{Ом}), \quad R_3 = A + N + 40 \quad (\text{Ом}), \quad C_1 = A + N + 20$$

$$(\text{мкФ}), \quad \varphi = A + N + 30 \quad (\text{градусів}), \quad \omega = A + N + 200 \quad (\text{рад/с}).$$

Розрахувати закони зміни у часі струми та напругу на конденсаторі після замикання ключа Q .

Електричне коло на рис. 4.2.П.1 має наступні параметри: $R_1, R_{11}, R_2, R_3, C_1, E_1$ (В) та $e_2 = E_2 \sqrt{2} \sin(\omega t + \varphi)$ (В).

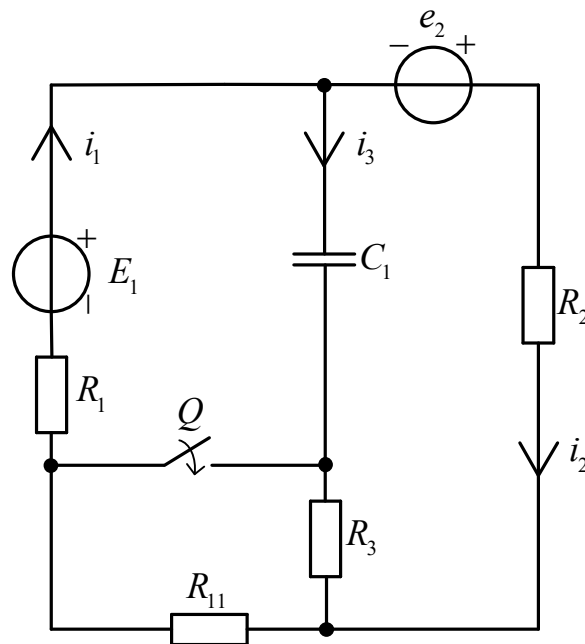


Рисунок 4.2.П.1 – Електрична схема

Практика №7 Розрахунок перехідного процесу в RLC колі енергії при дії постійних джерел енергії

Практика для самостійного опрацювання студентами наведеного матеріалу

Розрахунок усталених режимів до і після комутації. Складання характеристичного рівняння кола та визначення його коренів Особливості розрахунку початкових умов для струмів і напруг в колі з двома накопичувачами енергії. Знаходження розв'язків для вільних складових при дійсних та комплексно-спряжених коренях. Запис загальних розв'язків, побудова часових графіків перехідних струмів і напруг.

Порядок розрахунку перехідного процесу класичним методом:

1. Вибрати позитивний напрямок струмів у вітках.
2. Скласти за законами Кірхгофа систему інтегрально-диференціальних рівнянь для схеми після комутації (УРПК).
3. Представити рішення отриманої системи для шуканої функції у вигляді суми вимушеної та вільної складових.
4. Знайти вимушені струми та напруги в усталеному режимі для схеми після комутації.
5. Скласти характеристичне рівняння кола та знайти його корені.
6. У залежності від виду коренів записати рішення для вільної складової шуканої величини.
7. У відповідності до пункту 3 записати шукану функцію у вигляді суми знайдених вище вимушеної та вільної складових. Для схеми з двома реактивними елементами взяти похідну за часом від цього виразу.
8. Підставити в останній вираз момент часу $t=0$ та отримати систему рівнянь відносно сталих інтегрування.
9. Визначити початкові умови для шуканих величин.
10. Розрахувати сталі інтегрування.

Задача 1

Електричне коло на рис. 7.1.1 має наступні параметри: $E_1 = 100$ (В), $E_2 = 60$ (В), $R_1 = R_2 = 10$ (Ом), $R'_1 = R_3 = 20$ (Ом), $L_1 = 1$ (Гн) та $C_1 = 400$ (мкФ).

Визначити після замикання ключа Q закони зміни у часі струмів i_1, i_2, i_3 та напруги u_{L_1}, u_{C_1} [1].

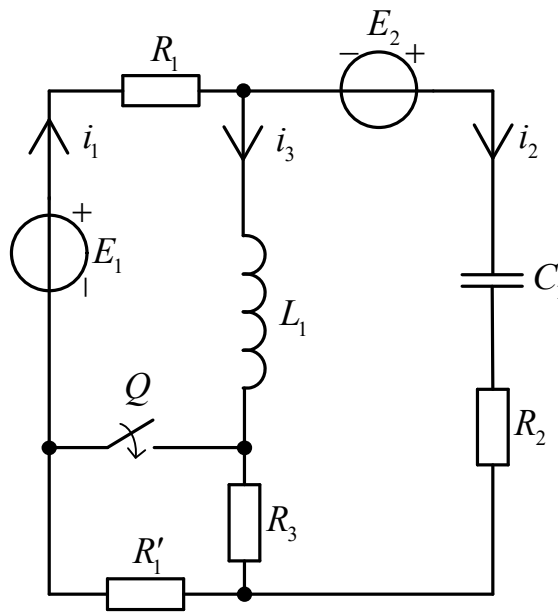


Рисунок 7.1.1 – Електрична схема

Рішення

Система рівнянь для схеми після комутації (УРПК рис. 7.1.2)

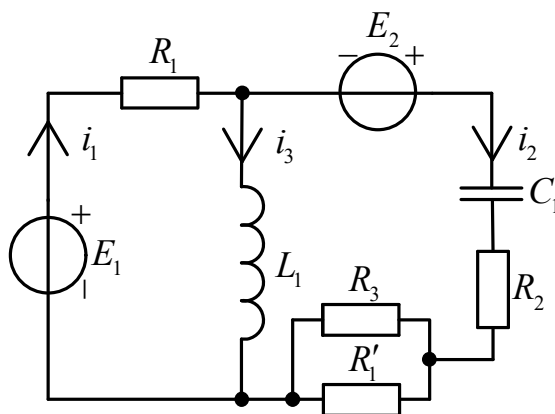


Рисунок 7.1.2 – Електрична схема в УРПК

$$R_{22} = R_2 + \frac{R_1' \cdot R_3}{R_1' + R_3} = 10 + \frac{20 \cdot 20}{20 + 20} = 20(\text{Ом});$$

$$\begin{cases} i_1 = i_2 + i_3; \\ i_1 \cdot R_1 + L_1 \cdot \frac{di_3}{dt} = E_1; \\ i_1 \cdot R_1 + u_{C1} + i_2 \cdot R_{22} = E_1 + E_2. \end{cases} \quad (7.1.1)$$

Визначимо перехідні струми i_1, i_2 та i_3 , напругу на індуктивності за формулою $u_{L1} = L_1 \cdot \frac{di_3}{dt}$, напругу на конденсаторі – за другим законом Кірхгофа.

Представимо рішення отриманої системи для шуканої функції у вигляді суми вимушеної та вільної складових:

$$\begin{aligned} i_2 &= i_2' + i_2''; \\ i_3 &= i_3' + i_3''. \end{aligned} \quad (7.1.2)$$

Розрахуємо струми для усталеного режиму після комутації:

$$\begin{aligned} i_2' &= 0; \\ i_3' = i_1' &= \frac{E_1}{R_1} = \frac{100}{10} = 10(\text{А}). \end{aligned} \quad (7.1.3)$$

Визначимо корені характеристичного рівняння:

$$\begin{aligned} \Delta(p) &= \begin{vmatrix} R_1 + p \cdot L_1 & -p \cdot L_1 \\ -p \cdot L_1 & R_{22} + p \cdot L_1 + \frac{1}{p \cdot C_1} \end{vmatrix} = \\ &= (R_1 + p \cdot L_1) \cdot (R_{22} + p \cdot L_1 + \frac{1}{p \cdot C_1}) - (p \cdot L_1)^2 = 0; \\ p_1 &= -10.5, (\text{с}^{-1}); \tau_1 = \frac{1}{|p_1|} = \frac{1}{|-10.5|} = 0.095, (\text{с}); \\ p_2 &= -79.5, (\text{с}^{-1}); \tau_2 = \frac{1}{|p_2|} = \frac{1}{|-79.5|} = 0.013, (\text{с}). \end{aligned} \quad (7.1.4)$$

Вільні значення струмів i_2'' та i_3'' запишемо:

$$\begin{aligned} i_2'' &= A_1 \cdot e^{p_1 \cdot t} + A_2 \cdot e^{p_2 \cdot t} = A_1 \cdot e^{-10.5 \cdot t} + A_2 \cdot e^{-79.5 \cdot t}; \\ i_3'' &= B_1 \cdot e^{p_1 \cdot t} + B_2 \cdot e^{p_2 \cdot t} = B_1 \cdot e^{-10.5 \cdot t} + B_2 \cdot e^{-79.5 \cdot t}. \end{aligned} \quad (7.1.5)$$

Представимо перехідні струми i_2 та i_3 , як результат накладання вимушеного та вільного режимів:

$$\begin{aligned} i_2 &= i_2' + i_2'' = 0 + A_1 \cdot e^{-10.5 \cdot t} + A_2 \cdot e^{-79.5 \cdot t}; \\ i_3 &= i_3' + i_3'' = 10 + B_1 \cdot e^{-10.5 \cdot t} + B_2 \cdot e^{-79.5 \cdot t}. \end{aligned} \quad (7.1.6)$$

Візьмемо похідну за часом від виразу (4.3.1.6):

$$\begin{aligned} \frac{di_2}{dt} &= -10.5 \cdot A_1 \cdot e^{-10.5 \cdot t} - 79.5 \cdot A_2 \cdot e^{-79.5 \cdot t}; \\ \frac{di_3}{dt} &= -10.5 \cdot B_1 \cdot e^{-10.5 \cdot t} - B_2 \cdot e^{-79.5 \cdot t}. \end{aligned} \quad (7.1.7)$$

Запишемо попарно рівняння для відповідних струмів та їх похідних та підставимо $t=0$, та визначимо рівняння відносно постійних інтегрування:

$$\begin{cases} i_2(0) = A_1 + A_2; \\ \left. \frac{di_2}{dt} \right|_{t=0} = -10.5 \cdot A_1 - 79.5 \cdot A_2; \end{cases} \begin{cases} i_3(0) = 10 + B_1 + B_2; \\ \left. \frac{di_3}{dt} \right|_{t=0} = -10.5 \cdot B_1 - 79.5 \cdot B_2. \end{cases} \quad (7.1.8)$$

Сталі інтегрування визначимо з початкових умов. Необхідно розрахувати $i_2(0)$, $i_3(0)$, а також $\left. \frac{di_2}{dt} \right|_{t=0}$ та $\left. \frac{di_3}{dt} \right|_{t=0}$. Розрахуємо усталений режим до комутації (УРДК):

$$\begin{aligned} i_{2(-0)} &= 0; \\ i_{1(-0)} = i_{3(-0)} &= \frac{E_1}{R_1' + R_1 + R_3} = \frac{100}{10 + 20 + 20} = 2(\text{A}); \\ i_3(0) = i_{3(-0)} &= 2(\text{A}); \\ u_{C1}(0) = u_{C1(-0)} &= i_{3(-0)} \cdot R_3 + E_2 = 2 \cdot 20 + 60 = 100(\text{В}). \end{aligned} \quad (7.1.9)$$

Залежні початкові умови визначимо з інтегрально-диференціальних рівнянь:

$$\begin{cases} i_1(0) = i_2(0) + i_3(0); \\ i_1(0)R_1 + L_1 \cdot \frac{di_3}{dt} \Big|_{t=0} = E_1; \\ i_1(0) \cdot R_1 + u_{C1}(0) + i_2(0) \cdot R_{22} = E_1 + E_2; \end{cases}$$

$$\begin{cases} i_1(0) = i_2(0) + 2; \\ i_1(0) \cdot 10 + L_1 \cdot \frac{di_3}{dt} \Big|_{t=0} = 100; \\ i_1(0) \cdot 10 + 100 + i_2(0) \cdot 20 = 160; \end{cases}$$

$$\begin{aligned} i_1(0) &= 3.33(\text{A}); \\ i_2(0) &= 1.33(\text{A}); \end{aligned}$$

$$L_1 \frac{di_3}{dt} \Big|_{t=0} = 66.7 \left(\frac{\text{A}}{\text{c}} \right). \quad (7.1.10)$$

Візьмемо похідну за часом перше та третє рівняння системи (7.1.10) від та підставимо $t = 0$:

$$\begin{aligned} \frac{di_1}{dt} \Big|_{t=0} &= \frac{di_2}{dt} \Big|_{t=0} + \frac{di_3}{dt} \Big|_{t=0}; \\ \frac{di_1}{dt} \Big|_{t=0} \cdot R_1 + \frac{i_2(0)}{C_1} + \frac{di_2}{dt} \Big|_{t=0} \cdot R_{22} &= 0; \\ \frac{di_2}{dt} \Big|_{t=0} &= -133 \left(\frac{\text{A}}{\text{c}} \right). \end{aligned} \quad (7.1.11)$$

Визначаємо сталі інтегрування:

$$\begin{aligned} \begin{cases} 1.33 = A_1 + A_2; \\ -133 = -10.5 \cdot A_1 - 79.5 \cdot A_2; \end{cases} & \begin{cases} 2 = 10 + B_1 + B_2; \\ 66.7 = -10.5 \cdot B_1 - 79.5 \cdot B_2; \end{cases} \\ A_1 &= -0.39; \\ A_2 &= 1.72; \\ B_1 &= -8.25; \\ B_2 &= 0.25. \end{aligned} \quad (7.1.12)$$

Запишемо миттєве значення струмів під час перехідного процесу:

$$\begin{aligned} i_2(t) &= -0.39 \cdot e^{-10.5t} + 1.72 \cdot e^{-79.5t} \text{ (A)}; \\ i_3(t) &= 10 - 8.25 \cdot e^{-10.5t} + 0.25 \cdot e^{-79.5t} \text{ (A)}. \end{aligned} \quad (7.1.13)$$

Знайдемо за першим законом Кірхгофа струм $i_1(t)$

$$i_1(t) = i_2(t) + i_3(t) = 10 - 8.64 \cdot e^{-10.5t} + 1.97 \cdot e^{-79.5t} \text{ (A)}. \quad (7.1.14)$$

Розрахуємо напругу на індуктивності

$$u_{L1}(t) = L_1 \cdot \frac{di_3(t)}{dt} = 86.6 \cdot e^{-10.5t} - 19.87 \cdot e^{-79.5t} \text{ (В)}. \quad (7.1.15)$$

Визначимо напругу на конденсаторі

$$u_{C1}(t) = E_1 + E_2 - i_1 \cdot R_1 - i_2 \cdot R_{22} = 60 + 94 \cdot e^{-10.5t} - 54 \cdot e^{-79.5t} \text{ (В)}. \quad (7.1.16)$$

Представимо на рис. 7.1.3 закони зміни у часі струмів i_1, i_2, i_3 та напруги u_{L1}, u_{C1} , коли перехідний процес триває $t_{\text{ПП}} = 5 \cdot \tau_1 = 5 \cdot 0.095 = 0.0476 \text{ (с)}$.

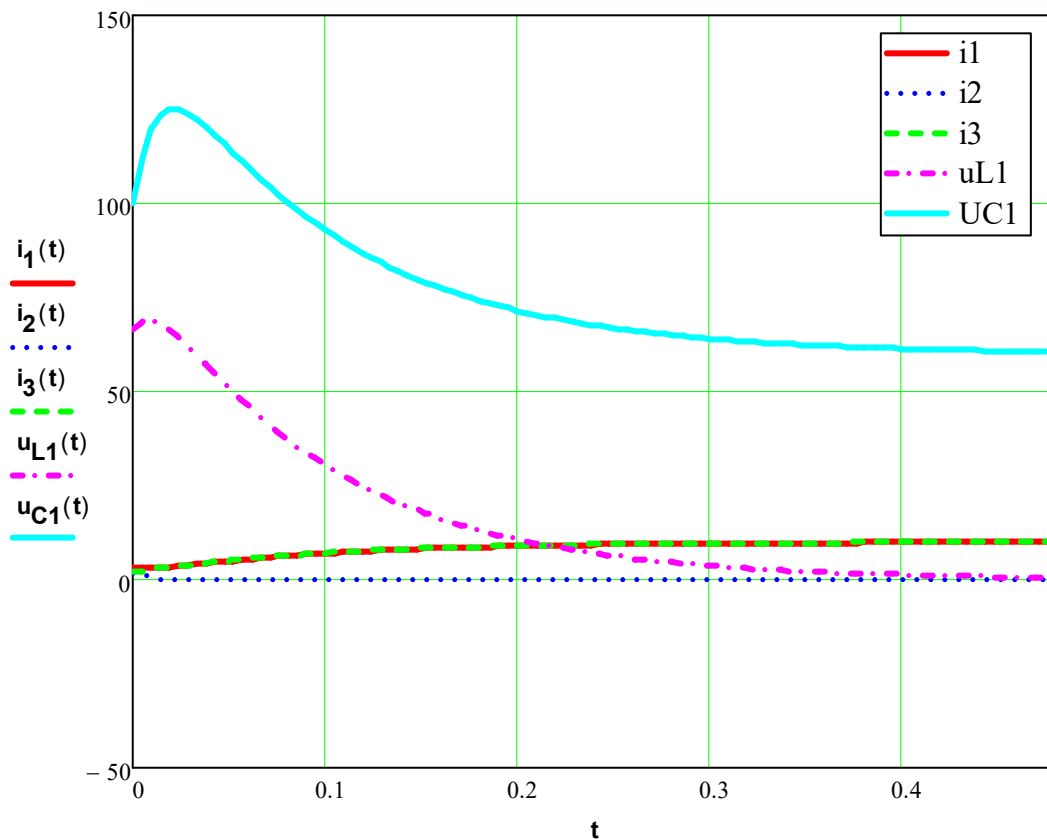


Рисунок 4.3.1.3 – Закони зміни у часі струмів i_1, i_2, i_3 та напруги u_{L1}, u_{C1}

Задача 2

Електричне коло на рис. 7.2.1 вмикається наступну напругу $U=125$ (В).
Необхідно знайти вираз миттєвого значення напруги u_C на конденсаторі при:

- 1) $R=250$ (Ом), $C=2$ (мкФ), $L=667$ (мГн);
- 2) $R=100$ (Ом), $C=1$ (мкФ), $L=40$ (мГн);
- 3) $R=100$ (Ом), $C=5$ (мкФ), $L=40$ (мГн) [2].

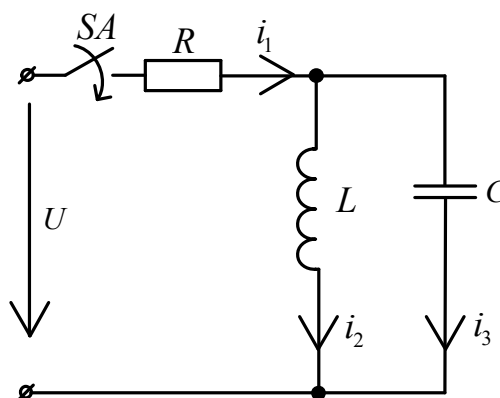


Рисунок 7.2.1 – Електрична схема

Рішення

Напруга на конденсаторі складається з усталеної та вільної складової

$$u_C = u'_C + u''_C \quad (7.2.1)$$

Усталене значення напруги на конденсаторі дорівнює нулю $u'_C = 0$, так як усталене значення струму i'_2 незмінне, та відповідно, воно не створює падіння напруги на індуктивності $u'_C = u'_L = L \cdot \frac{di'_2}{dt} = 0$ (в усталеному режимі конденсатор шунтований індуктивністю котушки (закоротка)).

Для знаходження вільної складової складемо характеристичний вхідний опір та прирівняємо його до нуля

$$Z(p) = R + \frac{p \cdot L \cdot \frac{1}{p \cdot C}}{p \cdot L + \frac{1}{p \cdot C}} = 0. \quad (7.2.2)$$

В отриманому характеристичному рівнянні звільнимся від знаменника, приводячи до виду

$$R \cdot L \cdot C \cdot p^2 + L \cdot p + R = 0. \quad (7.2.3)$$

Це рівняння другого порядку та, відповідно має два кореня

$$p_{1,2} = -\frac{1}{2 \cdot R \cdot C} \pm \sqrt{\frac{1}{4 \cdot R^2 \cdot C^2} - \frac{1}{L \cdot C}}. \quad (7.2.4)$$

Зазначимо, що вільна складова напруги на конденсаторі має дві сталих інтегрування. Для визначення постійних інтегрування складемо рівняння за законами Кірхгофа

$$\begin{cases} i_1 = i_2 + i_3; \\ U = R \cdot i_1 + u_C. \end{cases} \quad (7.2.5)$$

Запишемо незалежні початкові умови:

$$\begin{aligned} u_{C(0_-)} &= u_{C(0_+)} = 0; \\ i_{2(0_-)} &= i_{2(0_+)} = 0. \end{aligned}$$

Підставимо їх до системи (7.2.5) для початкового моменту часу (після комутації) та отримаємо

$$\begin{cases} i_{1(0_+)} = i_{2(0_+)} + i_{3(0_+)}; \\ U = R \cdot i_{1(0_+)} + u_{C(0_+)}. \end{cases} \quad (7.2.6)$$

Знаходимо $i_{3(0_+)}$. Потім, використовуючи залежність $i_3 = C \cdot \frac{du_C}{dt}$ моменту час у $t=0_+$, отримаємо

$$i_{3(0_+)} = C \cdot \left. \frac{du_C}{dt} \right|_{t=0_+} \quad (7.2.7)$$

I. Підставив у рівняння (7.2.4) числові значення для першого випадку

$$p_{1,2} = -\frac{1}{2 \cdot 250 \cdot 0.000002} \pm \sqrt{\frac{1}{4 \cdot 250^2 \cdot 0.000002^2} - \frac{1}{0.667 \cdot 0.000002}};$$

$$p_1 = -500(\text{с}^{-1});$$

$$p_2 = -1500(\text{с}^{-1}). \quad (7.2.8)$$

Отримані корені дійсні від'ємні та різні, відповідно, вільна складова напруги на конденсаторі

$$u_C'' = A_1 \cdot e^{-500 \cdot t} + A_2 \cdot e^{-1500 \cdot t}. \quad (7.2.9)$$

Далі з рівняння (7.2.6) з урахуванням початкових умов отримаємо

$$\begin{cases} i_{1(0_+)} = i_{2(0_+)} + i_{3(0_+)} = 0 + i_{3(0_+)}; \\ U = R \cdot i_{1(0_+)} + u_{C(0_+)} = 250 \cdot i_{1(0_+)} + 0 = 125. \end{cases} \quad (7.2.10)$$

Вирішуючи цю систему рівнянь, $i_{3(0_+)} = 0.5$ (А). Підставив у рівняння (7.2.1) та у вираз струму i_3 рівняння (7.2.9), отримаємо

$$\begin{cases} u_C(t) = u_C' + u_C'' = 0 + A_1 \cdot e^{-500 \cdot t} + A_2 \cdot e^{-1500 \cdot t}; \\ i_3(t) = C \cdot \frac{du_C}{dt} = 0.000002 \cdot (-500 \cdot A_1 \cdot e^{-500 \cdot t} - 1500 \cdot A_2 \cdot e^{-1500 \cdot t}). \end{cases} \quad (7.2.11)$$

Перепишемо ці рівняння для моменту часу у $t=0_+$, та потім, підставимо $u_{C(0_+)} = 0$ та, $i_{3(0_+)} = 0.5$ (А), отримаємо

$$\begin{cases} 0 = 0 + A_1 + A_2; \\ 0.5 = -0.001 \cdot A_1 - 0.003 \cdot A_2. \end{cases} \quad (7.2.12)$$

Звідси $A_1 = -A_2 = 250$. Шукана напруга дорівнює

$$u_C(t) = u_C'' = 250 \cdot e^{-500t} - 250 \cdot e^{-1500t}. \quad (7.2.13)$$

Знайдемо струми i_1 , i_2 та i_3 й побудуємо їх графіки:

$$\begin{aligned} i_3(t) &= C \cdot \frac{du_C}{dt} = 0.000002 \cdot \frac{d}{dt} (250 \cdot e^{-500t} - 250 \cdot e^{-1500t}) = \\ &= 0.75 \cdot e^{-1500t} - 0.25 \cdot e^{-500t} \text{ (A);} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} i_1(t) &= \frac{U - u_C}{R} = \frac{125 - (250 \cdot e^{-500t} - 250 \cdot e^{-1500t})}{250} = \\ &= 0.5 - e^{-500t} + e^{-1500t} \text{ (A);} \end{aligned} \quad (7.2.14)$$

$$\begin{aligned} i_2(t) &= i_1(t) - i_3(t) = \\ &= (0.5 - e^{-500t} + e^{-1500t}) - (0.75 \cdot e^{-1500t} - 0.25 \cdot e^{-500t}) = \\ &= 0.5 - 0.75 \cdot e^{-500t} + 0.25 \cdot e^{-1500t} \text{ (A).} \end{aligned}$$

Графіки струмів та напруги представлені на рис. 7.2.2.

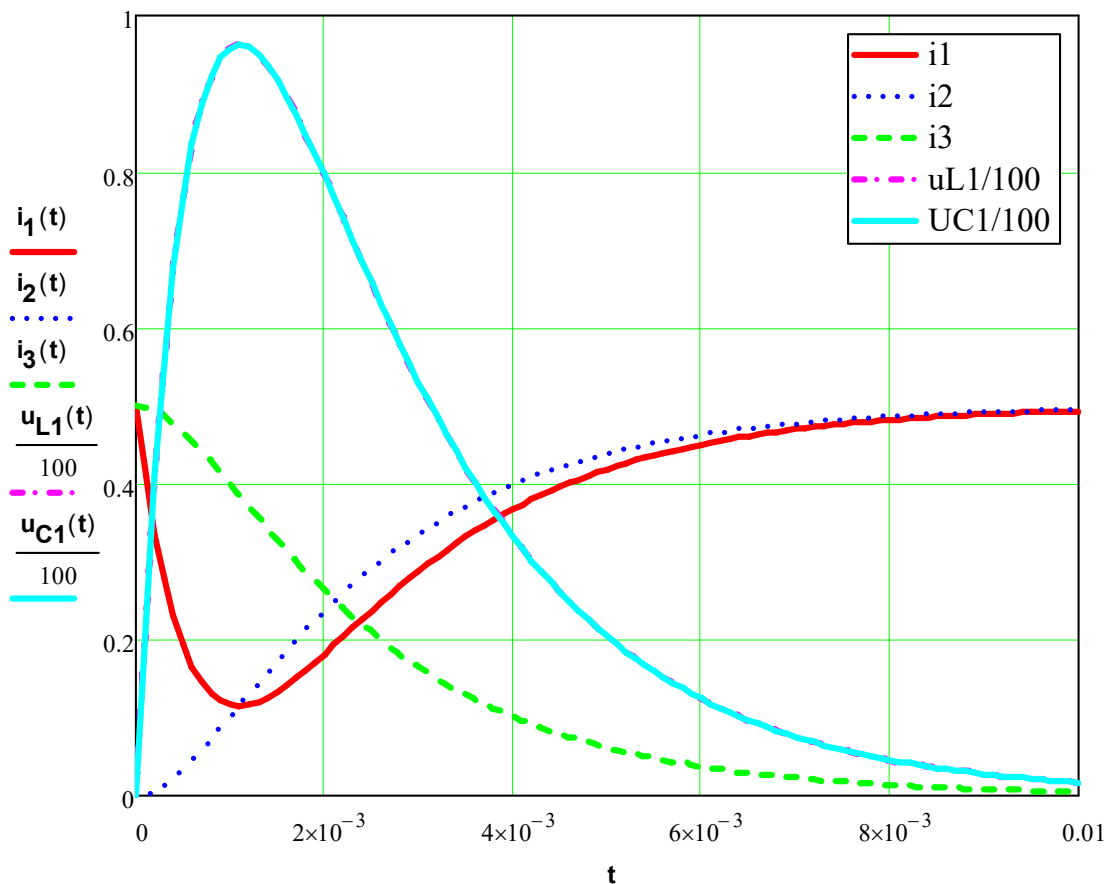


Рисунок 7.2.2 - Перехідні процеси струмів та напруги при дійсних, від'ємних та різних коренях характеристичного рівняння

II. Підставив у рівняння (7.2.4) числові значення для другого випадку

$$p_{1,2} = -\frac{1}{2 \cdot 100 \cdot 0.000001} \pm \sqrt{\frac{1}{4 \cdot 100^2 \cdot 0.000001^2} - \frac{1}{0.04 \cdot 0.000001}}; \quad (7.2.15)$$

$$p_{1,2} = -5000(\text{с}^{-1}).$$

Корінь – двократний, відповідно, рішення шукаємо у вигляді

$$u_C = B_1 \cdot e^{-5000 \cdot t} + B_2 \cdot t \cdot e^{-5000 \cdot t}. \quad (7.2.16)$$

Далі з рівняння (7.2.6) з урахуванням початкових умов отримаємо $i_{3(0_+)} = 1.25$ (А). Підставив в рівняння (7.2.1) та у вираз струму i_3 рівняння (7.2.16), отримаємо

$$\begin{cases} u_C(t) = u'_C + u''_C = 0 + B_1 \cdot e^{-5000 \cdot t} + t \cdot B_2 \cdot e^{-5000 \cdot t}; \\ i_3(t) = C \cdot \frac{du_C}{dt} = 0.000001 \cdot (B_2 \cdot e^{-5000 \cdot t} - 5000 \cdot B_1 \cdot e^{-5000 \cdot t} - t \cdot 5000 \cdot B_2 \cdot e^{-5000 \cdot t}). \end{cases} \quad (7.2.17)$$

Перепишемо ці рівняння для моменту часу у $t=0_+$, та потім, підставимо $u_{C(0_+)} = 0$ та $i_{3(0_+)} = 1.25$ (А), отримаємо

$$\begin{cases} 0 = B_1; \\ 1.25 = 0.000001 \cdot (B_2 - 5000 \cdot B_1). \end{cases} \quad (7.2.18)$$

Звідси $B_1 = 0, B_2 = 1.25 \cdot 10^6$. Шукана напруга дорівнює

$$u_C(t) = u''_C = 1.25 \cdot 10^6 \cdot t \cdot e^{-5000 \cdot t}, \text{(В)}. \quad (7.2.19)$$

Знайдемо струми i_1, i_2 та i_3 й побудуємо їх графіки:

$$i_3(t) = C \cdot \frac{du_C}{dt} = 10^{-6} \cdot \frac{d}{dt} (1.25 \cdot 10^6 \cdot t \cdot e^{-5000 \cdot t}) =$$

$$= 1.25 \cdot e^{-5000 \cdot t} - 6250 \cdot t \cdot e^{-5000 \cdot t} \text{ (A)};$$

$$i_1(t) = \frac{U - u_C}{R} = \frac{125 - (1.25 \cdot 10^6 \cdot t \cdot e^{-5000 \cdot t})}{100} = \quad (7.2.20)$$

$$= 1.25 - 12500 \cdot t \cdot e^{-5000 \cdot t} \text{ (A)};$$

$$i_2(t) = i_1(t) - i_3(t) =$$

$$= (1.25 - 12500 \cdot t \cdot e^{-5000 \cdot t}) - (1.25 \cdot e^{-5000 \cdot t} - 6250 \cdot t \cdot e^{-5000 \cdot t}) =$$

$$= 1.25 - 12500 \cdot t \cdot e^{-5000 \cdot t} + 6250 \cdot t \cdot e^{-5000 \cdot t} - 1.25 \cdot e^{-5000 \cdot t} \text{ (A)}.$$

Графіки струмів та напруги представлені на рис. 7.2.3.

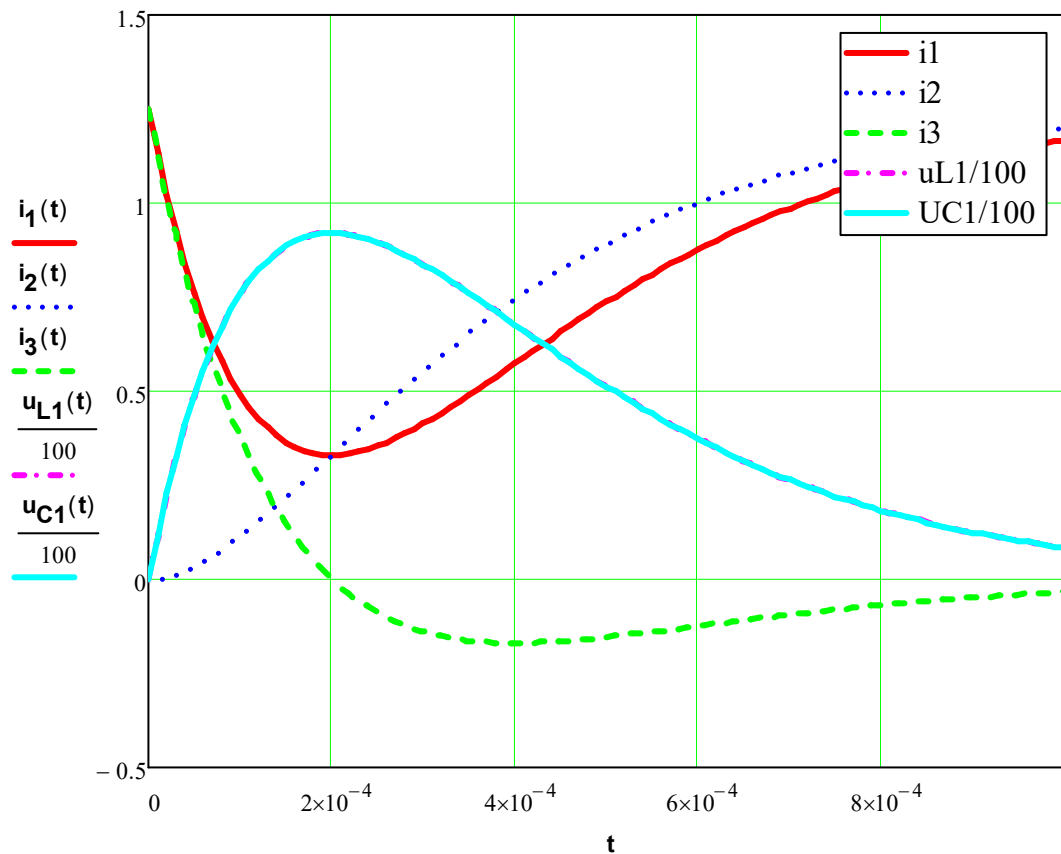


Рисунок 7.2.3 - Перехідні процеси струмів та напруги при дійсних, від'ємних та однакових коренях характеристичного рівняння

III. Підставив у рівняння (7.2.20) числові значення для третього випадку

$$p_{1,2} = -\frac{1}{2 \cdot 100 \cdot 0.000005} \pm \sqrt{\frac{1}{4 \cdot 100^2 \cdot 0.000005^2} - \frac{1}{0.04 \cdot 0.000005}}; \quad (7.2.21)$$

$$p_{1,2} = (-1000 \pm j2000), (c^{-1}).$$

Корені характеристичного рівняння створюють комплексно спряжену пару чисел ($p_{1,2} = -\alpha \pm j\omega$), відповідно, вільна складова напруги на конденсаторі має наступний вигляд

$$u_C'' = C \cdot e^{-\alpha t} \sin(\omega \cdot t + \psi) = C \cdot e^{-1000t} \sin(2000 \cdot t + \psi) \quad (7.2.22)$$

По аналогії до попереднього випадку із рівняння (7.2.6) з врахуванням початкових умов, отримаємо $i_{3(0_+)} = 1.25$ (А). Підставив в рівняння (7.2.1) та у вираз i_3 рівняння (7.2.22), отримаємо:

$$u_C = u_C' + u_C'' = 0 + C \cdot e^{-1000t} \sin(2000 \cdot t + \psi);$$

$$i_3 = C \cdot \frac{du_C}{dt} = \quad (7.2.23)$$

$$= 0.000005 \cdot C \cdot e^{-1000t} \cdot (2000 \cdot \cos(2000t + \psi) - 1000 \cdot \sin(2000 \cdot t + \psi)).$$

Перепишуючи ці рівняння для моменту часу у $t=0_+$, та потім, підставляючи в них $u_{C(0_+)} = 0$ та $i_{3(0_+)} = 1.25$ (А), маємо:

$$0 = 0.000005 \cdot C \cdot \sin(\psi);$$

$$1.25 = 0.000005 \cdot C \cdot (2000 \cdot \cos(\psi) - 1000 \cdot \sin(\psi)). \quad (7.2.24)$$

Звідси $\psi=0$, $C=125$. Шукана напруга дорівнює

$$u_C(t) = u_C'' = 125 \cdot e^{-1000t} \cdot \sin(2000 \cdot t) \text{ (В)}. \quad (7.2.25)$$

Знайдемо струми i_1 , i_2 та i_3 й побудуємо їх графіки:

$$i_3(t) = C \cdot \frac{du_C}{dt} = 5 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{d}{dt} (125 \cdot e^{-1000t} \cdot \sin(2000 \cdot t)) =$$

$$= 1.25 \cdot e^{-1000t} \cdot \cos(2000 \cdot t) - 0.625 \cdot e^{-1000t} \cdot \sin(2000 \cdot t) (\text{A});$$

$$i_1(t) = \frac{U - u_C}{R} = \frac{125 - (125 \cdot e^{-1000t} \cdot \sin(2000 \cdot t))}{100} =$$

$$= 1.25 - 1.2500 \cdot e^{-1000t} \cdot \sin(2000 \cdot t) (\text{A}); \quad (7.2.26)$$

$$i_2(t) = i_1(t) - i_3(t) =$$

$$= (1.25 - 1.2500 \cdot e^{-1000t} \cdot \sin(2000 \cdot t)) - \dots$$

$$\dots - (1.25 \cdot e^{-1000t} \cdot \cos(2000 \cdot t) - 0.625 \cdot e^{-1000t} \cdot \sin(2000 \cdot t)) =$$

$$= 1.25 - 0.625 \cdot e^{-1000t} \cdot \sin(2000 \cdot t) - 1.25 \cdot e^{-1000t} \cdot \cos(2000 \cdot t) (\text{A}).$$

Графіки струмів та напруги представлені на рис. 7.2.4.

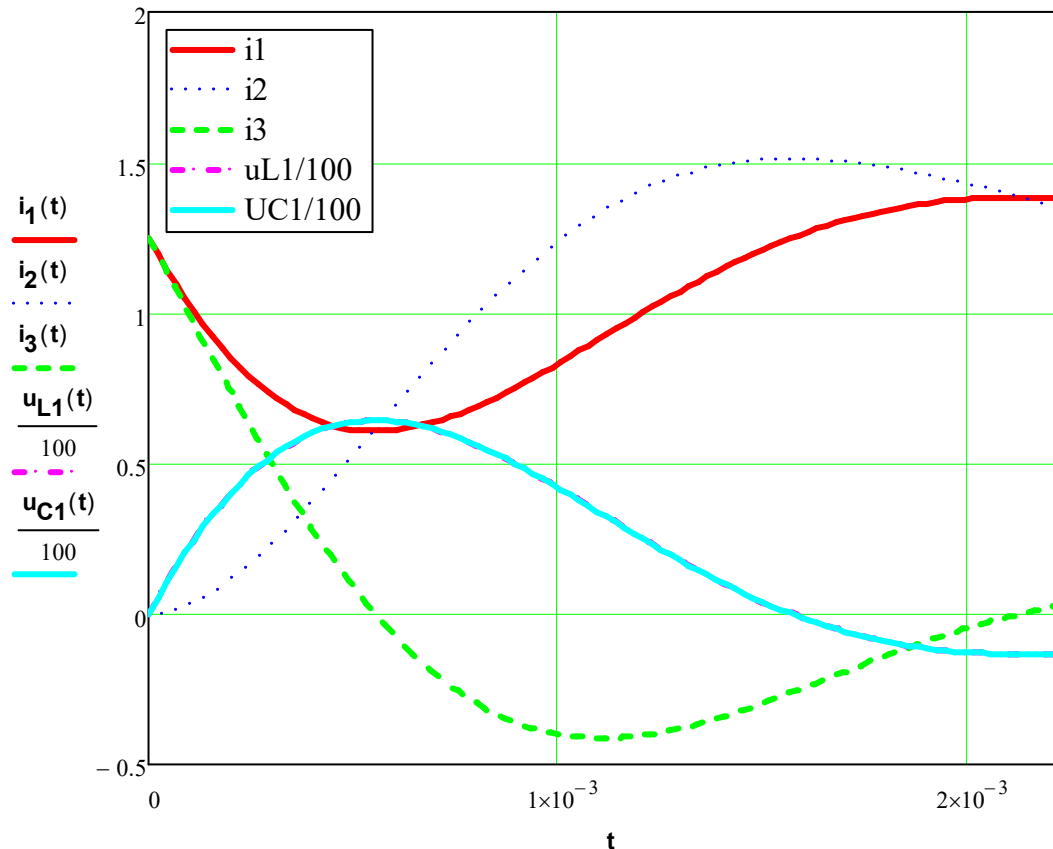


Рисунок 7.2.4 - Перехідні процеси струмів та напруги при комплексно-спряжених коренях характеристичного рівняння

Задача 3

Коло на рис. 7.2.1 вмикається наступну напругу $U=100$ (В). Знайти вираз миттєвого значення струму i_2 в індуктивності при $R=100$ (Ом), $C=5$ (мкФ), $L=40$ (мГн) [2].

Рішення

Представимо рішення шуканої функції у вигляді суми вимушеної та вільної складових

$$i_2 = i_2' + i_2'' \quad (7.3.1)$$

Розрахувавши УРПК знайдемо вимушене значення

$$\begin{aligned} i_3 &= 0; \\ i_1'' = i_2'' &= \frac{U}{R} = \frac{100}{100} = 1(\text{А}). \end{aligned} \quad (7.3.2)$$

Вільна складова струму i_2'' має наступний вигляд (вираз 2.21)

$$i_2'' = D \cdot e^{-\alpha \cdot t} \cdot \sin(\omega t + \psi) = D \cdot e^{-1000 \cdot t} \cdot \sin(2000 \cdot t + \psi). \quad (7.3.3)$$

Для визначення постійних інтегрування D та ψ запишемо для початкового моменту часу (після комутації) вираз струму i_2 відповідно до рівняння $i_2 = i_2' + i_2''$

$$\begin{aligned} i_{2(0+)} &= i'_{2(0+)} + i''_{2(0+)} = \frac{U}{R} + D \cdot e^{-\alpha \cdot t} \sin(\omega \cdot t + \psi) \Big|_{t=0+} = \\ &= \frac{100}{100} + D \cdot e^{-1000 \cdot 0} \sin(2000 \cdot 0 + \psi) = 1 + D \cdot \sin(\psi); \\ \frac{di_{2(0+)}}{dt} \Big|_{t=0+} &= \frac{di'_{2(0+)}}{dt} \Big|_{t=0+} + \frac{di''_{2(0+)}}{dt} \Big|_{t=0+} = \\ &= 0 - 1000 \cdot D \sin(\psi) + 2000 \cdot D \cdot \cos(\psi). \end{aligned} \quad (7.3.4)$$

Початкові значення визначимо за допомогою незалежних початкових умов $u_{C(0_+)} = u_{C(0_-)} = 0, i_{2(0_+)} = i_{2(0_-)} = 0$. По закону Кірхгофа для електричного кола

$$u_{L(0_+)} = L \cdot \left. \frac{di_2}{dt} \right|_{t=0_+} = u_{C(0_+)} = 0, \quad (7.3.5)$$

а похідна струму у початковий момент часу дорівнює

$$\left. \frac{di_2}{dt} \right|_{t=0_+} = 0. \quad (7.3.6)$$

Підставимо знайдені початкові значення у рівняння (7.3.4)

$$\begin{aligned} 0 &= 1 + D \cdot \sin(\psi); \\ 0 &= -1000 \cdot D \sin(\psi) + 2000 \cdot D \cdot \cos(\psi); \end{aligned} \quad (7.3.7)$$

$$0 = -1000 \cdot \frac{\cancel{D} \cdot \sin(\psi)}{\cancel{D} \cdot \sin(\psi)} + 2000 \cdot \frac{\cancel{D} \cdot \cos(\psi)}{\cancel{D} \cdot \sin(\psi)} = -1000 + 2000 \cdot \operatorname{ctg}(\psi);$$

$$\operatorname{ctg}(\psi) = 0.5; \psi = 63.30^\circ; \sin(63.30^\circ) = 0.895; D = \frac{-1}{\sin(63.30^\circ)} = -1.12.$$

Запишемо миттєве значення струму i_2 під час комутації

$$i_2(t) = 1 - 1.12 \cdot e^{-1000t} \cdot \sin(2000 \cdot t + 63.30^\circ), (\text{A}). \quad (7.3.8)$$

Графік перехідного процесу струму i_2 наведений на рис. 7.3.1.

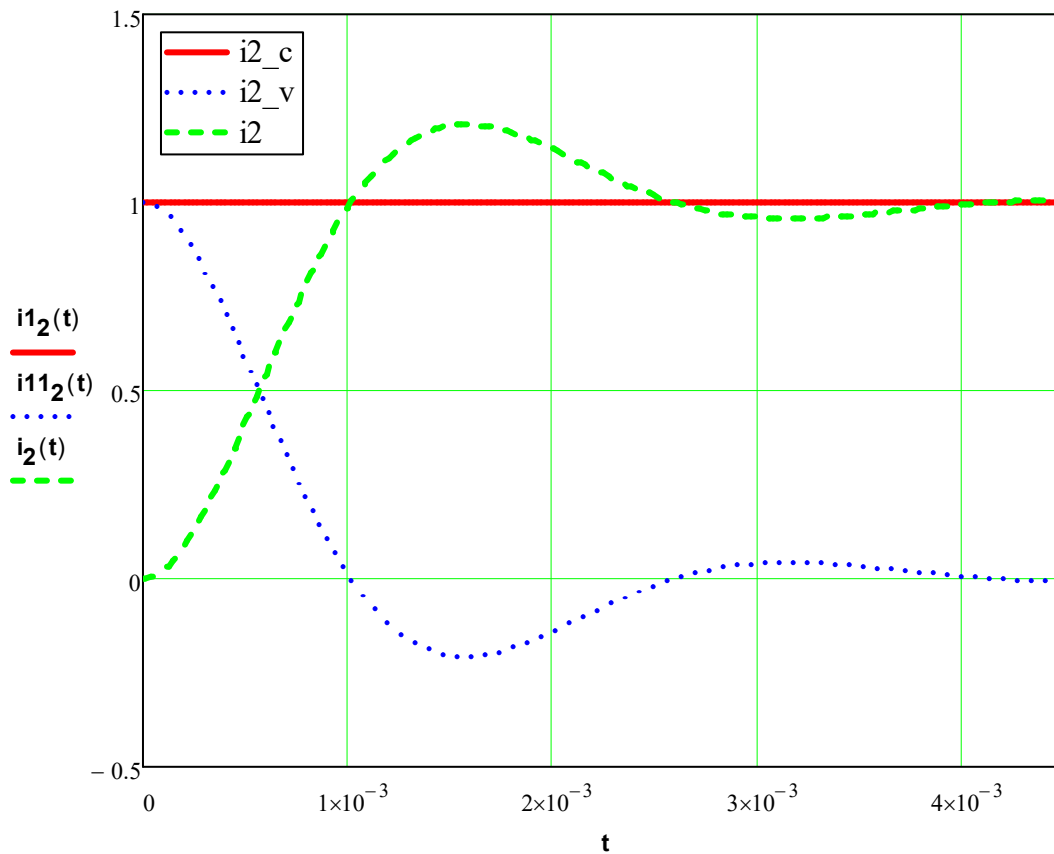


Рисунок 7.3.1 - Перехідні процеси струму i_2

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Корощенко О.В. «Теоретичні основи електротехніки. Збірник задач: навчальний посібник» / укл. О.В. Корощенко, В.Ф. Денник, О.А. Журавель та ін.; за заг.ред. О.В. Корощенка.- Донецьк, ДВНЗ «ДонНТУ», 2012.- 673 с.
2. Курило І.А. Розрахунок перехідних процесів у лінійних електричних колах : навч. посіб. / І.А. Курило, В.П. Грудська, Л.Ю. Спінул, М.А. Щерба.-К.: НТУУ «КПІ», 2013.-289 с.

Практичне заняття №8 Операторний метод розрахунку перехідного процесу в колі з двома накопичувачами енергії

Розрахунок усталеного режиму до комутації та визначення незалежних початкових умов. Побудова операторної розрахункової схеми. Складання рівнянь для зображень струмів (напруг) та знаходження зображень шуканих величин. Знаходження оригіналів струмів (напруг).

Операторний метод

Так як перехідний процес описується лінійними інтегрально-диференціальними рівняннями зі сталими коефіцієнтами, то їх можна вирішити також операторним методом. Суть операторного методу полягає у тому, що дійсна (реальна) змінна (часу t) зіставляється функція комплексної змінної $p = s + j\omega$, причому ці функції однозначно пов'язані між собою перетворенням Лапласа [1]

$$F(p) = \int_0^{\infty} e^{-pt} f(t) dt, \quad (8.1)$$

де функцію дійсної змінної $f(t)$ - оригінал; функцію комплексної змінної $F(p)$ - зображення.

Відзначимо найбільш вживані часові залежності та їх зображення:

- 1) зображення сталої величини

$$f(t) = A; F(p) = \frac{A}{p}. \quad (8.2)$$

- 2) зображення експоненти:

$$\begin{aligned}
f(t) &= e^{\alpha t}; F(p) = \frac{1}{p - \alpha}; \\
f(t) &= e^{-\alpha t}; F(p) = \frac{1}{p + \alpha}; \\
f(t) &= e^{j\omega t}; F(p) = \frac{1}{p - j\omega}; \\
f(t) &= e^{-j\omega t}; F(p) = \frac{1}{p + j\omega}.
\end{aligned}
\tag{8.3}$$

3) зображення синусоїдної функції:

$$\begin{aligned}
f(t) &= \sin(\omega t); F(p) = \frac{\omega}{p^2 + \omega^2}; \\
f(t) &= \cos(\omega t); F(p) = \frac{p}{p^2 + \omega^2}; \\
f(t) &= A_m \sin(\omega t + \psi); \\
F(p) &= A_m \cos(\psi) \frac{\omega}{p^2 + \omega^2} + A_m \sin(\psi) \frac{p}{p^2 + \omega^2}.
\end{aligned}
\tag{8.4}$$

Для синусоїдної функції можна отримати більш просте зображення, якщо попередньо представити її у комплексній формі:

$$\begin{aligned}
f(t) &= A_m \sin(\omega t + \psi) \rightarrow A_m e^{j(\omega t + \psi)} = A_m e^{j\psi} e^{j\omega t}; \\
A_m e^{j\psi} e^{j\omega t} &\rightarrow \frac{A_m e^{j\psi}}{p - j\omega}.
\end{aligned}
\tag{8.5}$$

4) зображення похідної (напруга на індуктивності):

$$\begin{aligned}
f(t) &= i; F(p) = I(p); \\
\frac{di}{dt} &\rightarrow pI(p) - i(0); \\
\boxed{L \frac{di}{dt} \rightarrow pL \cdot I(p) - L \cdot i(0)}.
\end{aligned}
\tag{8.6}$$

5) зображення інтеграла (напруга на конденсаторі):

$$\int_0^t i dt \rightarrow \frac{I(p)}{p};$$

$$\boxed{u_C(t) = u_C(0) + \frac{1}{C} \int_0^t i dt \rightarrow \frac{u_C(0)}{p} + \frac{I(p)}{pC}}. \quad (8.7)$$

Таким чином, система інтегрально-диференціальних рівнянь відносно оригіналів замінюється системою алгебраїчних рівнянь відносно їх зображень. Систему рівнянь відносно зображень можна отримати зразу за операторною схемою, не записуючи рівняння для миттєвих значень напруг та струмів [1].

Особливостями схеми є:

1. Складається вона для електричного кола після комутації;
2. На схемі позначаються операторні опори $R, pL, \frac{1}{pC}$ відповідно для активного опору, котушки індуктивності та конденсатора.
3. Послідовно з індуктивністю та ємністю вмикаються розрахункові (внутрішні) ЕРС, причому розрахункова ЕРС індуктивності $L \cdot i(0)$ **співпадає з вибраним напрямком струму**, а розрахункова ЕРС конденсатора $\frac{u_C(0)}{p}$ - **проти вибраного напрямку струму**.
4. На операторній схемі показують зображення струмів та напруг на елементах у відповідності з їх вибором на заданій схемі.

За операторною схемою будь-яким методом розрахунку лінійних електричних кіл (контурних струмів, вузлових потенціалів, еквівалентних перетворень та т.п.) знаходяться зображення шуканих величин. За допомогою теореми розкладання робиться перехід від зображень до оригіналів шуканих величин.

$$F(p) = \frac{F_1(p)}{F_2(p)}; \quad f(t) = \sum_{k=1}^n \frac{F_1(p_k)}{F_2'(p_k)} e^{p_k t}, \quad (8.8)$$

де p_k - корені полінома знаменника $F_2(p) = 0$.

Розрахунок перехідного процесу операторним методом подібний до розрахунку усталених процесів у колах синусоїдного струму символьним методом, коли здійснюється перехід від миттєвого значення синусоїдних величин до їх зображень у комплексній формі [1].

Методика розрахунку перехідного процесу операторним методом [1]:

1. Вибрати позитивний напрямок струмів у вітках.
2. Визначити незалежні початкові умови, а потім розрахувати ЕРС

$$L \cdot i(0) \text{ та } \frac{u_C(0)}{p}.$$

3. Представити операторну схему.
4. За операторною схемою знайти зображення шуканих функцій.
Привести зображення до стандартного виду

$$F(p) = \frac{F_1(p)}{F_2(p)}. \quad (8.9)$$

5. Прирівняти $F_2(p) = 0$ та визначити корені.
6. Знайти похідну $F_2'(p)$.
7. Визначити $F_1(p_k)$ та $F_2'(p_k)$ для усіх значень струмів.
8. Записати вираз для оригіналів шуканих величин за теоремою розкладання

$$f(t) = \frac{F_1(p_1)}{F_2'(p_1)} e^{p_1 t} + \frac{F_1(p_2)}{F_2'(p_2)} e^{p_2 t} + \dots + \frac{F_1(p_n)}{F_2'(p_n)} e^{p_n t}. \quad (8.10)$$

Задача 1

Електричне коло на рис. 1 має наступні параметри: $E_1=100$ (В), $E_2=60$ (В), $R_1=R_2=10$ (Ом), $R'_1=R_3=20$ (Ом), $L_1=1$ (Гн) та $C_1=400$ (мкФ).

Визначити після замикання ключа Q закони зміни у часі струмів i_1 , i_2 , i_3 та напруги u_{L1} , u_{C1} операторним методом [1].

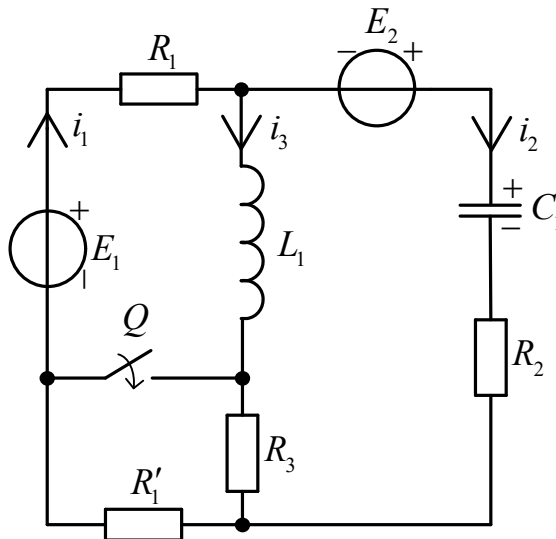


Рисунок 8.1.1 – Електрична схема

Рішення

Визначимо незалежні початкові умови та внутрішні ЕРС:

$$\begin{aligned}
 i_1(0) = i_3(-0) &= \frac{E_1}{R'_1 + R_1 + R_3} = \frac{100}{10 + 20 + 20} = 2 \text{ (А)}; \\
 L \cdot i_3(0) &= 1 \cdot 2 = 2 \text{ (Вс)}; \\
 u_{C1}(0) = u_{C1}(-0) &= i_3(-0)R_3 + E_2 = 2 \cdot 20 + 60 = 100 \text{ (В)}; \\
 \frac{u_{C1}(0)}{p} &= \frac{100}{p} \text{ (Вс)}.
 \end{aligned}
 \tag{8.1.1}$$

Схема в операторній формі показана на рис. 8.1.2.

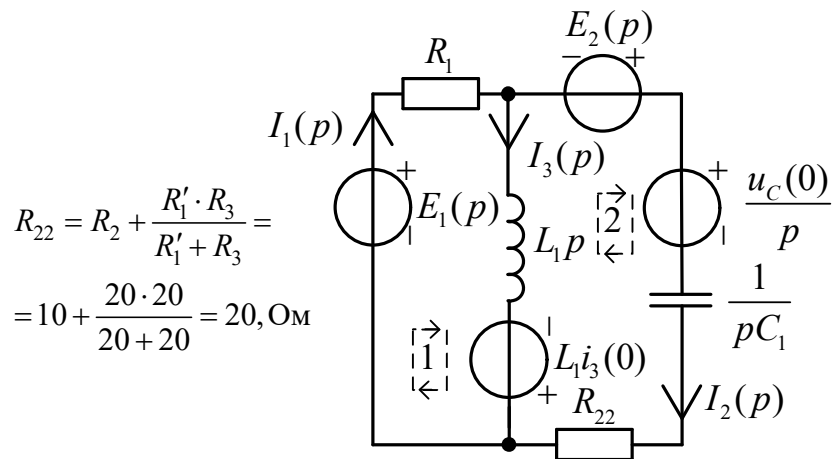


Рисунок 8.1.2 – Електрична схема в операторній формі

Складемо рівняння за методом контурних струмів

$$\begin{cases} I_1(p)(R_1 + pL_1) - I_2(p)(pL_1) = \frac{E_1}{p} + L_1 i_{3(0-)}; \\ -I_1(p)(pL_1) + I_2(p)(R_{22} + pL_1 + \frac{1}{pC_1}) = \frac{E_2}{p} - \frac{u_{C1(0-)}}{p} - L_1 i_{3(0-)}. \end{cases} \quad (8.1.2)$$

Підставимо числові значення та рішимо систему

$$\begin{cases} I_1(p)(10 + p) - I_2(p)p = \frac{100}{p} + 2; \\ -I_1(p)p + I_2(p)(20 + p + \frac{2500}{p}) = \frac{60}{p} - \frac{100}{p} - 2; \end{cases}$$

$$\Delta(p) = \begin{vmatrix} 10 + p & -p \\ -p & 20 + p + \frac{2500}{p} \end{vmatrix} = \frac{30p^2 + 2700p + 25000}{p};$$

$$\Delta_1(p) = \begin{vmatrix} \frac{100}{p} + 2 & -p \\ -\frac{40}{p} - 2 & 20 + p + \frac{2500}{p} \end{vmatrix} = \frac{100p^2 + 7000p + 250000}{p};$$

$$\Delta_2(p) = \begin{vmatrix} 10 + p & \frac{100}{p} + 2 \\ -p & -\frac{40}{p} - 2 \end{vmatrix} = \frac{40p - 400}{p}. \quad (8.1.3)$$

Визначимо зображення струмів:

$$I_1(p) = \frac{\Delta_1(p)}{\Delta(p)} = \frac{100p^2 + 7000p + 250000}{p(30p^2 + 2700p + 25000)} = \frac{F_1(p)}{F_2(p)};$$

$$I_2(p) = \frac{\Delta_2(p)}{\Delta(p)} = \frac{40p - 400}{30p^2 + 2700p + 25000}.$$
(8.1.4)

Зображення напруги на конденсаторі з урахуванням внутрішньої ЕРС

$$U_{C1}(p) = I_2(p) \frac{1}{pC_1} + \frac{u_{C1}(0)}{p} =$$

$$= \frac{3 \cdot 10^3 p^2 + 3.7 \cdot 10^5 p + 15 \cdot 10^5}{p(30p^2 + 2700p + 25000)} = \frac{H_1(p)}{H_2(p)}.$$
(8.1.5)

Визначимо миттєве значення вхідного струму $i_1(t)$. Прирівняємо $F_2(p)$ до нуля та знайдемо корені

$$p(30p^2 + 2700p + 25000) = 0;$$

$$p_1 = 0; p_2 = -10.5 (\text{с}^{-1}); p_3 = -79.5 (\text{с}^{-1}).$$
(8.1.6)

Візьмемо похідну від $F_2(p)$

$$F_2'(p) = 90p^2 + 5400p + 25 \cdot 10^3.$$
(8.1.7)

Розрахуємо $F_1(p_k)$ та $F_2'(p_k)$:

$$p_1 = 0;$$

$$F_1(p_1) = 25 \cdot 10^4;$$

$$F_2'(p_1) = 25 \cdot 10^3;$$

$$p_2 = -10.5 (\text{с}^{-1});$$

$$F_1(p_2) = 100(-10.5)^2 + 7000(-10.5) + 25 \cdot 10^4 = 187.5 \cdot 10^3;$$

$$F_2'(p_2) = 90(-10.5)^2 + 5400(-10.5) + 25 \cdot 10^3 = -21.8 \cdot 10^3;$$
(8.1.8)

$$p_3 = -79.5 (\text{с}^{-1});$$

$$F_1(p_3) = 100(-79.5)^2 + 7000(-79.5) + 25 \cdot 10^4 = 325 \cdot 10^3;$$

$$F_2'(p_3) = 90(-79.5)^2 + 5400(-79.5) + 25 \cdot 10^3 = 164 \cdot 10^3.$$

Перехідний струм у вітках з джерелом ЕРС E_1 має наступний вигляд

$$\begin{aligned} i_1(t) &= \frac{25 \cdot 10^4}{25 \cdot 10^3} + \frac{187.5 \cdot 10^3}{-21.8 \cdot 10^3} e^{-10.5t} + \frac{325 \cdot 10^3}{164 \cdot 10^3} e^{-79.5t} = \\ &= 10 - 8.6e^{-10.5t} + 1.98e^{-79.5t} \text{ (A)}. \end{aligned} \quad (8.1.9)$$

Розрахуємо напругу на конденсаторі у перехідному режимі. Прирівняємо $H_2(p)$ до нуля та знайдемо корені

$$\begin{aligned} p(30p^2 + 2700p + 25000) &= 0; \\ p_1 = 0; p_2 = -10.5(\text{с}^{-1}); p_3 = -79.5(\text{с}^{-1}). \end{aligned} \quad (8.1.10)$$

Візьмемо похідну від $H_2(p)$

$$H_2'(p) = 90p^2 + 5400p + 25 \cdot 10^3. \quad (8.1.11)$$

Розрахуємо $H_1(p_k)$ та $H_2'(p_k)$:

$$\begin{aligned} p_1 &= 0; \\ H_1(p_1) &= 15 \cdot 10^5; \\ H_2'(p_1) &= 25 \cdot 10^3; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} p_2 &= -10.5(\text{с}^{-1}); \\ H_1(p_2) &= 3 \cdot 10^3(-10.5)^2 + 3.7 \cdot 10^5(-10.5) + 15 \cdot 10^5 = -20.54 \cdot 10^5; \\ H_2'(p_2) &= 90(-10.5)^2 + 5400(-10.5) + 25 \cdot 10^3 = -21.8 \cdot 10^3; \end{aligned} \quad (8.1.12)$$

$$\begin{aligned} p_3 &= -79.5(\text{с}^{-1}); \\ H_1(p_3) &= 3 \cdot 10^3(-79.5)^2 + 3.7 \cdot 10^5(-79.5) + 15 \cdot 10^5 = 89.54 \cdot 10^3; \\ H_2'(p_3) &= 90(-79.5)^2 + 5400(-79.5) + 25 \cdot 10^3 = 164 \cdot 10^3. \end{aligned}$$

Визначимо напругу на конденсаторі

$$\begin{aligned} u_{C1}(t) &= \frac{15 \cdot 10^5}{25 \cdot 10^3} + \frac{-20.54 \cdot 10^5}{-21.8 \cdot 10^3} e^{-10.5t} + \frac{-89.54 \cdot 10^3}{164 \cdot 10^3} e^{-79.5t} = \\ &= 60 + 94.31e^{-10.5t} - 54.43e^{-79.5t} \text{ (В)}. \end{aligned} \quad (8.1.13)$$

Характер перехідного процесу (аперіодичний, граничний аперіодичний

або коливальний) у схемі з двома різнорідними реактивними елементами залежить тільки від її параметрів. Як відомо, аперіодичний режим спостерігається в колі, якщо корені характеристичного рівняння дійсні та різні, коливальний – коли корні комплексні та спряжені. Якщо корені дійсні та рівні, то в колі маємо **граничний аперіодичний режим**.

Запишемо характеристичне рівняння для схеми

$$\begin{aligned} \Delta(p) &= \begin{vmatrix} R_{\text{ікр}} + pL_1 & -pL_1 \\ -pL_1 & R_{22} + pL_1 + \frac{1}{pC_1} \end{vmatrix} = \\ &= \begin{vmatrix} R_{\text{ікр}} + pL_1 & -p \\ -p & 20 + p + \frac{2500}{p} \end{vmatrix} = 0. \end{aligned} \quad (8.1.14)$$

Розкриваючи визначник та спрощуючи, отримаємо рівняння

$$\begin{aligned} p^2 + p \frac{2500 + 20R_{\text{ікр}}}{20 + R_{\text{ікр}}} + \frac{2500 + 20R_{\text{ікр}}}{20 + R_{\text{ікр}}} &= 0; \\ p_{1,2} &= -\frac{2500 + 20R_{\text{ікр}}}{2(20 + R_{\text{ікр}})} \pm \sqrt{\frac{(2500 + 20R_{\text{ікр}})^2}{4(20 + R_{\text{ікр}})^2} - \frac{2500R_{\text{ікр}}}{20 + R_{\text{ікр}}}}; \\ \frac{(2500 + 20R_{\text{ікр}})^2}{4(20 + R_{\text{ікр}})^2} - \frac{2500R_{\text{ікр}}}{20 + R_{\text{ікр}}} &= 0; \\ R_{\text{ікр}} &= 26.8 \text{ (Ом)}. \end{aligned} \quad (8.1.15)$$

Задача 2

Електричне коло, що наведене на рис. 8.2.1, має наступні параметри: $E_1 = 260$ (В), $R_1 = 200$ (Ом), $R'_1 = 400$ (Ом), $R_2 = R_3 = 50$ (Ом), $L_1 = 0.1$ (Гн) та $C_1 = 10$ (мкФ).

Виконати розрахунок перехідного процесу операторним методом у колі, що зображено на рис. 8.2.1. В момент $t = 0$ ключ Q замикається [2].

1. Значення сили струму в індуктивності та напруги на ємності до початку перехідного процесу дорівнюють $i_2(0) = 0.4$ (А), $u_C(0-) = 20$ (В).

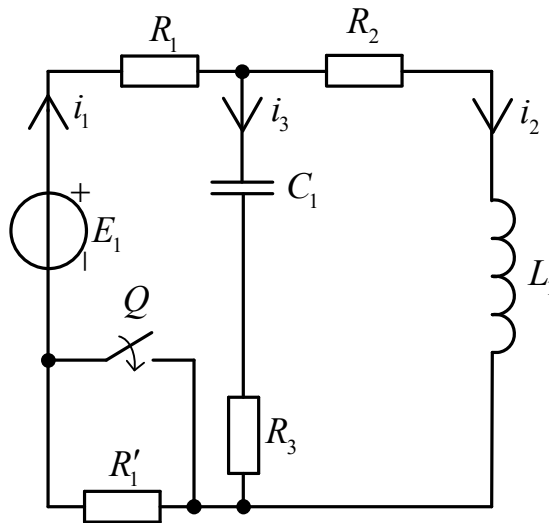
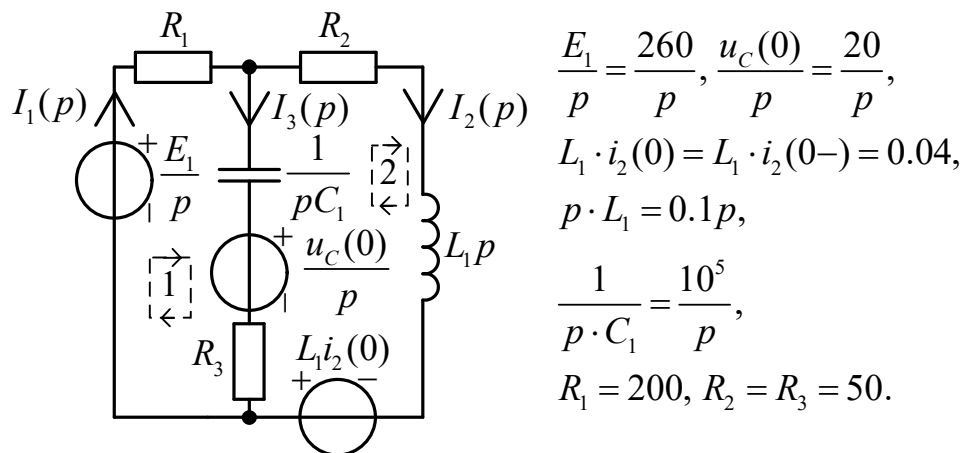


Рисунок 8.2.1 – Електрична схема

2. Зображення схеми в операторній формі (рис. 8.2.2).



$$\frac{E_1}{p} = \frac{260}{p}, \quad \frac{u_C(0)}{p} = \frac{20}{p},$$

$$L_1 \cdot i_2(0) = L_1 \cdot i_2(0-) = 0.04,$$

$$p \cdot L_1 = 0.1p,$$

$$\frac{1}{p \cdot C_1} = \frac{10^5}{p},$$

$$R_1 = 200, \quad R_2 = R_3 = 50.$$

Рисунок 8.2.2 – Електрична схема в операторній формі (після комутації)

3. Складемо рівняння для зображень струмів. Прийнемо струми $I_1(p)$ та $I_2(p)$ у якості контурних. Тоді рівняння для контурів 1 та 2 будуть наступними

$$\begin{cases} I_1(p)(R_1 + R_3 + \frac{1}{pC_1}) - I_2(p)(R_3 + \frac{1}{pC_1}) = \frac{E_1}{p} - \frac{u_{C1}(0)}{p}; \\ -I_1(p)(R_3 + \frac{1}{pC_1}) + I_2(p)(R_2 + R_3 + pL_1 + \frac{1}{pC_1}) = \frac{u_{C1}(0)}{p} + L_1 i_2(0). \end{cases} \quad (8.2.1)$$

$$\begin{cases} I_1(p)(250 + \frac{10^5}{p}) - I_2(p)(50 + \frac{10^5}{p}) = \frac{240}{p}; \\ -I_1(p)(50 + \frac{10^5}{p}) + I_2(p)(100 + 0.1p + \frac{10^5}{p}) = \frac{20}{p} + 0.04. \end{cases} \quad (8.2.2)$$

4. Рішення рівнянь (8.2.2) дає значення контурних струмів:

$$\begin{aligned} I_1(p) &= \frac{26p^2 + 29 \cdot 10^3 p + 26 \cdot 10^3}{p(25p^2 + 32.5 \cdot 10^3 p + 25 \cdot 10^6)} = \frac{N_1(p)}{M_1(p)}, \\ I_2(p) &= \frac{10p^2 + 21 \cdot 10^3 p + 26 \cdot 10^3}{p(25p^2 + 32.5 \cdot 10^3 p + 25 \cdot 10^6)} = \frac{N_2(p)}{M_2(p)}. \end{aligned} \quad (8.2.3)$$

Струм вітки з ємністю $I_3(p)$ знаходимо за I законом Кірхгофа

$$I_3(p) = I_1(p) - I_2(p) = \frac{16p + 8 \cdot 10^3}{25p^2 + 32.5 \cdot 10^3 p + 25 \cdot 10^6} = \frac{N_3(p)}{M_3(p)}. \quad (8.2.4)$$

Зображення напруги на індуктивності знаходимо як зображення похідної часової функції $u_L(t) = L_1 \frac{di_2}{dt}$

$$\boxed{U_{L1}(p) = pL_1 I_2(p) - L_1 I_2(0)} = \frac{0.8 \cdot 10^3 p + 1.6 \cdot 10^6}{25p^2 + 32.5 \cdot 10^3 p + 25 \cdot 10^6} = \frac{N_4(p)}{M_4(p)}. \quad (8.2.5)$$

Зображення напруги на конденсаторі $u_C(t) = u_C(0) + \frac{1}{C_1} \int_0^t i_3 dt$

$$\boxed{U_{C1}(p) = \frac{u_{C1}(0)}{p} + \frac{I_3(p)}{pC_1}} = \frac{500p^2 + 22.5 \cdot 10^5 p + 13 \cdot 10^6}{p(25p^2 + 32.5 \cdot 10^3 p + 25 \cdot 10^6)} = \frac{N_5(p)}{M_5(p)}. \quad (8.2.6)$$

5. Аналізуючи вирази для зображень струмів та напруг схеми (рис. 8.2.2), бачимо що всі знаменники $M_1(p) \dots M_5(p)$ мають два корені, що

визначаються з рівняння

$$25p^2 + 32.5 \cdot 10^3 p + 25 \cdot 10^6 = 0. \quad (8.2.6)$$

Крім того, у знаменниках струмів $I_1(p), I_2(p)$ та $U_{C1}(p)$ є ще корінь $p_3 = 0$, що визначає складові сталого режиму зазначених величин.

Вирішуючи рівняння (8.2.6) отримаємо корені:

$$\begin{aligned} p_1 &= -650 + j760, \\ p_2 &= -650 - j760. \end{aligned} \quad (8.2.7)$$

Знаходження оригіналів струмів та напруг за теоремою розкладання (8.10) дає від комплексно-спряжених коренів складові у вигляді комплексно-спряжених функцій. При додаванні таких складових в оригіналах струмів та напруг реальні частини подвоюються, а уявні – скорочуються. Тому формулу розкладання при наявності комплексно – спряжених коренів p_1 та p_2 можна записати

$$\frac{N(p)}{M(p)} \Leftrightarrow f(t) = 2 \cdot \operatorname{Re} \frac{N(p_1)}{M'(p_1)} e^{p_1 t} + \frac{N(0)}{M'(0)}. \quad (8.2.8)$$

Де $\frac{N(0)}{M'(0)}$ дає складову сталого режиму або від кореня $p = 0$ (якщо такий

корінь є у рівнянні $M(p) = 0$).

Для знаходження часової залежності $i_1(t)$ обраховуємо

$$\begin{aligned} M'_1(p) &= (25p^2 + 32.5 \cdot 10^3 p + 25 \cdot 10^6) + p(50 + 32.5 \cdot 10^3), \\ M'_1(p_1) &= (-650 + j760)(-32500 + j38000 + 32500) = \\ &= 1000 \cdot e^{j130.5^\circ} \cdot 38 \cdot 10^3 \cdot e^{j90.5^\circ} = 38 \cdot 10^6 \cdot e^{j220.5^\circ}, \\ M'_1(0) &= 25 \cdot 10^6, \\ N_1(0) &= 26 \cdot 10^6, \\ N_1(p_1) &= 26(-650 + j760)^2 + 29 \cdot 10^3(-650 + j760) + 26 \cdot 10^6 = \\ &= (3.12 - j3.65) \cdot 10^6 = 4.8 \cdot 10^6 \cdot e^{-j49.5^\circ}. \end{aligned} \quad (8.2.9)$$

У відповідності до (4.4.2.8) для $i_1(t)$ отримаємо

$$\begin{aligned}
 i_1(t) &= 2 \cdot \operatorname{Re} \frac{N_1(p_1)}{M_1'(p_1)} e^{p_1 t} + \frac{N_1(0)}{M_1'(0)} = 2 \cdot \operatorname{Re} \frac{4.8 \cdot 10^6 \cdot e^{-j \cdot 49.5^\circ}}{38 \cdot 10^6 \cdot e^{j \cdot 220.5^\circ}} e^{p_1 t} + \frac{26 \cdot 10^6}{25 \cdot 10^6} = \\
 &= 2 \cdot \operatorname{Re} 0.126 \cdot e^{-j \cdot 270^\circ} e^{(-650 + j 760)t} + 1.04 = 2 \cdot \operatorname{Re} 0.126 \cdot e^{-j \cdot 270^\circ} \cdot e^{-650t} \cdot e^{j 760t} + 1.04 = \\
 &= 2 \cdot \operatorname{Re} 0.126 \cdot e^{-650t} \cdot e^{j(760t - 270^\circ)} + 1.04 = 0.252 \cdot e^{-650t} \cos(760 \cdot t - 270^\circ) + 1.04 = \\
 &= -0.252 \cdot e^{-650t} \sin(760 \cdot t) + 1.04.
 \end{aligned} \tag{8.2.10}$$

Знаходження часової залежності $i_2(t)$ проводиться аналогічно

$$\begin{aligned}
 M_2'(p_1) &= M_1'(p_1) = 38 \cdot 10^6 \cdot e^{j \cdot 220.5^\circ}, \\
 M_2'(0) &= M_1'(0) = 25 \cdot 10^6, \quad N_2(0) = 26 \cdot 10^6, \\
 N_2(p_1) &= 10(-650 + j 760)^2 + 21 \cdot 10^3(-650 + j 760) + 26 \cdot 10^6 = \\
 &= (10.8 + j 6.08) \cdot 10^6 = 12.4 \cdot 10^6 \cdot e^{j \cdot 29.5^\circ}.
 \end{aligned} \tag{8.2.11}$$

У відповідності до (4.4.2.8) для $i_2(t)$ отримаємо

$$\begin{aligned}
 i_2(t) &= 2 \cdot \operatorname{Re} \frac{N_2(p_1)}{M_2'(p_1)} e^{p_1 t} + \frac{N_2(0)}{M_2'(0)} = 2 \cdot \operatorname{Re} \frac{12.4 \cdot 10^6 \cdot e^{j \cdot 29.5^\circ}}{38 \cdot 10^6 \cdot e^{j \cdot 220.5^\circ}} e^{p_1 t} + \frac{26 \cdot 10^6}{25 \cdot 10^6} = \\
 &= 2 \cdot \operatorname{Re} 0.32 \cdot e^{-j \cdot 191^\circ} e^{(-650 + j 760)t} + 1.04 = 0.652 \cdot e^{-650t} \cos(760 \cdot t - 191^\circ) + 1.04 = \\
 &= 0.652 \cdot e^{-650t} \sin(760 \cdot t - 101^\circ) + 1.04.
 \end{aligned} \tag{8.2.12}$$

У знаменниках зображень $I_3(p)$ та $U_{L1}(p)$ є тільки 2 комплексно-спряжених кореня p_1 та p_2 . Відсутність кореня $p_3 = 0$ показує на те, що у перехідному струмі $i_3(t)$ та напрузі $u_L(t)$ сталої складової немає. Визначимо перехідну напругу на індуктивності

$$\begin{aligned}
 M_4'(p) &= 50p^2 + 32.5 \cdot 10^3, \\
 M_4'(p_1) &= 50(-650 + j 760)^2 + 32.5 \cdot 10^3 = 38 \cdot 10^3 \cdot e^{j \cdot 90^\circ}, \\
 N_4(p_1) &= 0.8 \cdot 10^6(-650 + j 760) + 1.6 \cdot 10^6 \cdot 10^6 \\
 &= (1.08 + j 0.608) \cdot 10^6 = 12.4 \cdot 10^6 \cdot e^{j \cdot 29.4^\circ}, \\
 u_L(t) &= 2 \cdot \operatorname{Re} \frac{N_4(p_1)}{M_4'(p_1)} e^{p_1 t} = 2 \cdot \operatorname{Re} \frac{12.4 \cdot 10^6 \cdot e^{j \cdot 29.4^\circ}}{3.8 \cdot 10^4 \cdot e^{j \cdot 90^\circ}} e^{p_1 t} = \\
 &= 2 \cdot \operatorname{Re} 32.6 \cdot e^{-j \cdot 60.6^\circ} e^{(-650 + j 760)t} = 65.2 \cdot e^{-650t} \cos(760 \cdot t - 60.6^\circ) = \\
 &= 65.2 \cdot e^{-650t} \sin(760 \cdot t + 29.4^\circ).
 \end{aligned} \tag{8.2.13}$$

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Корощенко О.В. «Теоретичні основи електротехніки. Збірник задач: навчальний посібник» / укл. О.В. Корощенко, В.Ф. Денник, О.А. Журавель та ін.; за заг.ред. О.В. Корощенка.- Донецьк, ДВНЗ «ДонНТУ», 2012.- 673 с.
2. Курило І.А. Розрахунок перехідних процесів у лінійних електричних колах : навч. посіб. / І.А. Курило, В.П. Грудська, Л.Ю. Спінул, М.А. Щерба.-К.: НТУУ “КПІ”, 2013.-289 с.

Завдання для самостійного розрахунку перехідного процесу в електричному колі операторним методом

Непарні варіанти (за списком групи) виконують першу задачу, а парні другу. Параметри електричного кола:

$$A = \begin{cases} 10, & \text{для ЕД-;} \\ 20, & \text{для ЕВ-; } N=\text{номер у списку.} \\ 30, & \text{для ЕТ -} \end{cases}$$

$$E_1 = A + N \text{ (В)}, E_2 = A + N + 10 \text{ (В)}, R_1 = A + N + 2 \text{ (Ом)}, R_2 = A + N + 3 \text{ (Ом)}, R_3 = A + N + 4 \text{ (Ом)}, R_4 = A + N + 5 \text{ (Ом)}, C_1 = A + N + 100 \text{ (мкФ)}, L_1 = A + N + 200 \text{ (мГн)}.$$

Варіант №1	
<p>Завдання:</p> <p>1. Визначити закони зміни у часі усіх струмів у вітках електричного кола та напруги на паралельній ділянці після розмикання ключа Q.</p> <p>2. Побудувати графіки перехідних процесів координат електричного кола (струмів та напруг $t_{\text{III}} = 5\tau$) в залежності від сталої часу τ.</p>	<p>$E_1, \text{ В}$</p> <p>$E_2, \text{ В}$</p> <p>$R_1, \text{ Ом}$</p> <p>$R_2, \text{ Ом}$</p> <p>$R_3, \text{ Ом}$</p> <p>$L_1, \text{ мГн}$</p>

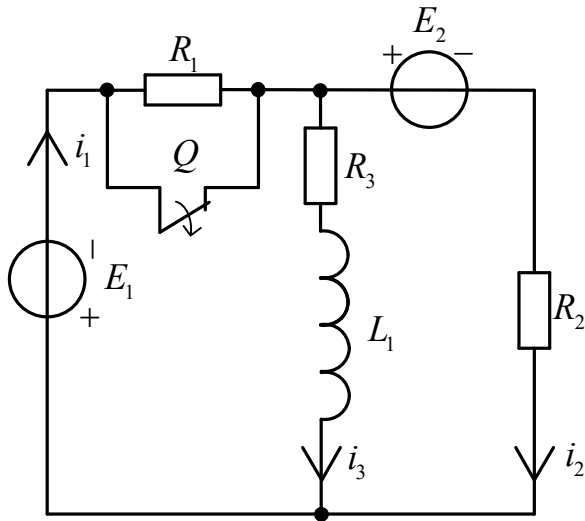


Рисунок 1

Варіант №2

Завдання:

1. Визначити закони зміни у часі усіх струмів у вітках електричного кола та напруги на конденсаторі після замикання ключа Q .

2. Побудувати графіки перехідних процесів координат електричного кола (струмів та напруг $t_{\text{III}} = 5\tau$) в залежності від сталої часу τ .

$E_1, \text{В}$

$E_2, \text{В}$

$R_1, \text{Ом}$

$R_2, \text{Ом}$

$R_3, \text{Ом}$

$C_1, \text{мкФ}$

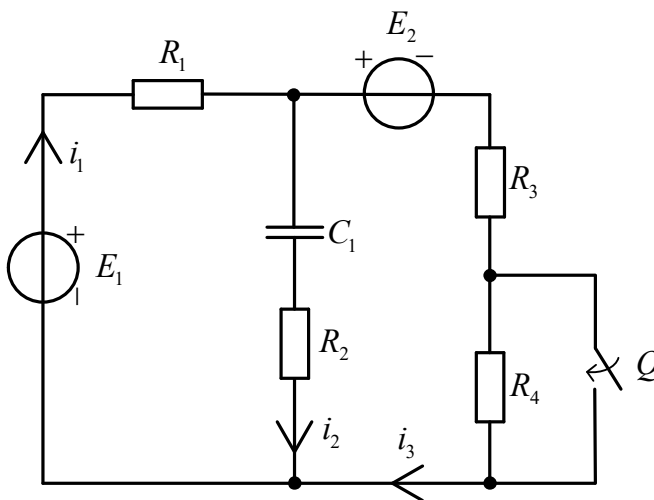


Рисунок 1

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Бойко В.С. Теоретичні основи електротехніки: Підручник: У 3 т. / В.С. Бойко, В.В. Бойко, Ю.Ф. Видолоб та ін. // Т.1: Усталені режими лінійних електричних кіл із зосередженими параметрами. – К.: ІВЦ "Видавництво «Політехніка»", 2004. – 272 с.

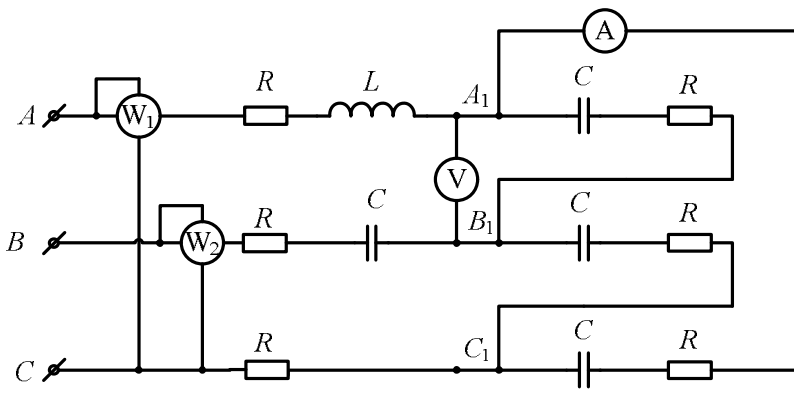
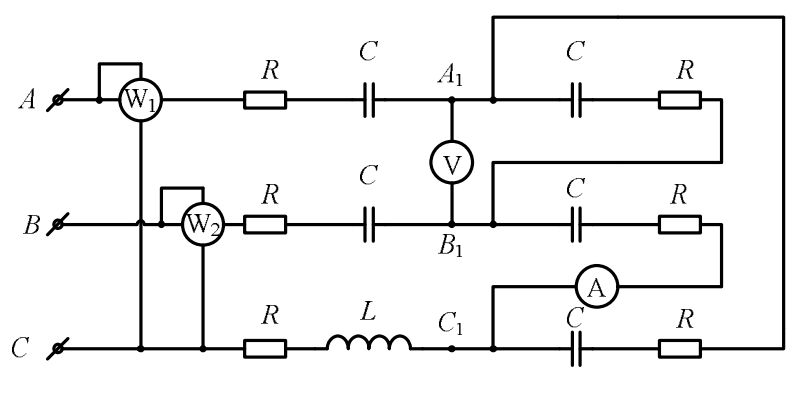
2. Бойко В.С. Теоретичні основи електротехніки. Частина 1. Навчальний посібник [Електронний ресурс]: навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра за освітніми програмами «Електричні системи і мережі», «Електричні станції» «Електричні машини і апарати», «Управління, захист та автоматизація енергосистем» «Електромеханічні системи автоматизації, електропривод та електромобільність», «Електротехнічні пристрої та електротехнологічні комплекси» «Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії» / В. С. Бойко, Л. Ю. Спінул, М. П. Бурик, В. Ю. Лободзтнський ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові данні (1 файл: 3,35 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 199 с.3.

3. Лінійні електричні кола постійного струму: Розрахунково-графічна робота [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», спеціалізацій «Електромеханічні системи автоматизації та електропривод», «Електричні машини і апарати», «Інжиніринг та автоматизація електротехнічних комплексів» й «Мехатроніка енергоємних виробництв» / М П. Бурик, Л. Ю. Спінул ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові данні (1 файл: 2,51 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 46 с.

ДОДАТОК А

Зразки завдань до модульної контрольної роботи (І частина)

«Розрахунок трифазного кола синусоїдного струму»

 <p style="text-align: center;">Рисунок А.1</p>	<p style="text-align: center;">Варіант №1</p> <p>Дано: Фазна напруга генератора прямої послідовності $\underline{U}_A = 220 \angle 0^\circ$ (В), $R = \omega L = \frac{1}{\omega C} = 12$ (Ом).</p> <p>Визначити покази вимірювальних приладів. Скласти баланс потужностей. Представити векторну діаграму напруг та струмів.</p>
 <p style="text-align: center;">Рисунок А.2</p>	<p style="text-align: center;">Варіант №2</p> <p>Дано: Фазна напруга генератора зворотної послідовності $\underline{U}_A = 220 \angle 10^\circ$ (В), $R = \omega L = \frac{1}{\omega C} = 18$ (Ом).</p> <p>Визначити покази вимірювальних приладів. Скласти баланс потужностей. Представити векторну діаграму напруг та струмів.</p>

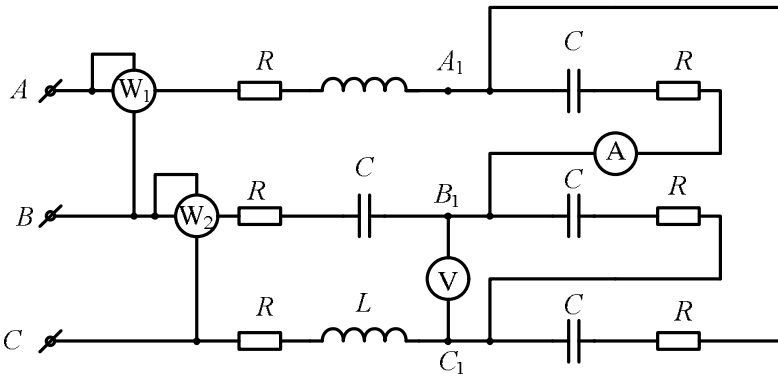


Рисунок А.3

Варіант №3

Дано: Фазна напруга генератора прямої послідовності

$$\underline{U}_A = 220 \angle 10^\circ (\text{В}),$$

$$R = \omega L = \frac{1}{\omega C} = 12 (\text{Ом}).$$

Визначити покази вимірювальних приладів. Скласти баланс потужностей. Представити векторну діаграму напруг та струмів.

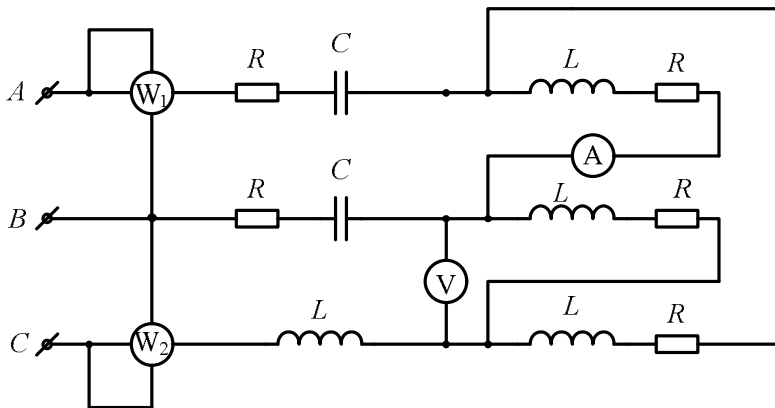


Рисунок А.4

Варіант №4

Дано: Фазна напруга генератора зворотної послідовності

$$\underline{U}_A = 220 \angle -10^\circ (\text{В}),$$

$$R = \omega L = \frac{1}{\omega C} = 24 (\text{Ом}).$$

Визначити покази вимірювальних приладів. Скласти баланс потужностей. Представити векторну діаграму напруг та струмів.

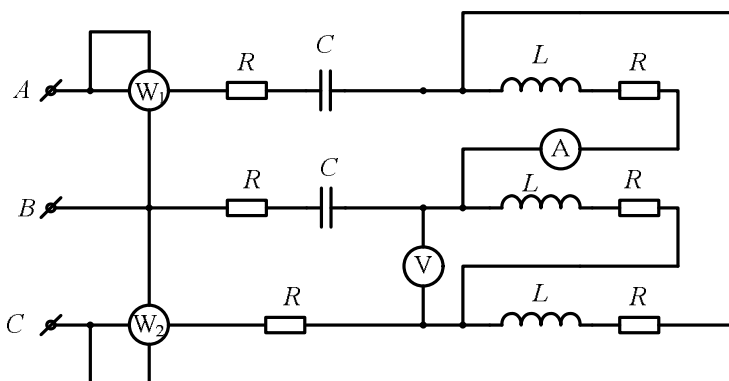


Рисунок А.5

Варіант №5

Дано: Фазна напруга генератора прямої послідовності

$$\underline{U}_A = 220 \angle 25^\circ (\text{В}),$$

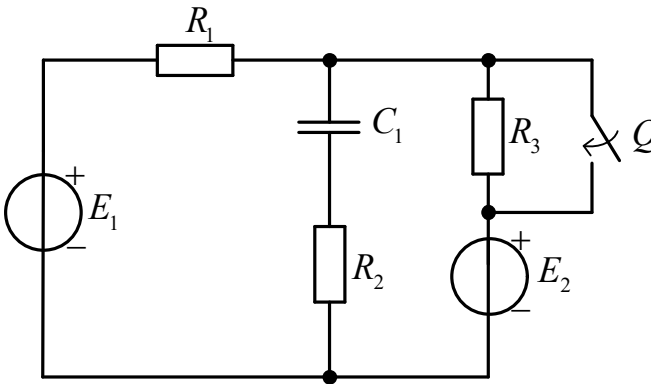
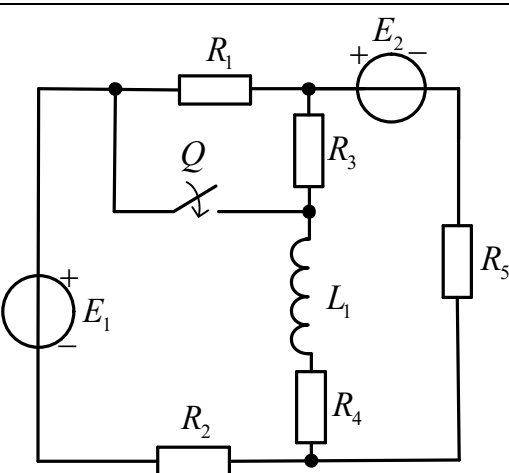
$$R = \omega L = \frac{1}{\omega C} = 39 (\text{Ом}).$$

Визначити покази вимірювальних приладів. Скласти баланс потужностей. Представити векторну діаграму напруг та струмів.

ДОДАТОК В

Зразки завдань до модульної контрольної роботи (II частина)

«Розрахунок перехідних процесів у лінійних колах»

<p style="text-align: center;">Варіант №1</p> <p>Завдання: ключ Q замикається.</p> <p>1. Визначити закони зміни у часі усіх струмів у вітках електричного кола та напруги на конденсаторі за допомогою операторного методу.</p>	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="padding: 2px 10px;">E_1, В</td><td style="padding: 2px 10px;">40</td></tr> <tr><td style="padding: 2px 10px;">E_2, В</td><td style="padding: 2px 10px;">100</td></tr> <tr><td style="padding: 2px 10px;">R_1, Ом</td><td style="padding: 2px 10px;">60</td></tr> <tr><td style="padding: 2px 10px;">R_2, Ом</td><td style="padding: 2px 10px;">200</td></tr> <tr><td style="padding: 2px 10px;">R_3, Ом</td><td style="padding: 2px 10px;">100</td></tr> <tr><td style="padding: 2px 10px;">C_1, мкФ</td><td style="padding: 2px 10px;">500</td></tr> </table>	E_1 , В	40	E_2 , В	100	R_1 , Ом	60	R_2 , Ом	200	R_3 , Ом	100	C_1 , мкФ	500				
E_1 , В	40																
E_2 , В	100																
R_1 , Ом	60																
R_2 , Ом	200																
R_3 , Ом	100																
C_1 , мкФ	500																
 <p style="text-align: center;">Рисунок В.1</p>																	
<p style="text-align: center;">Варіант №2</p> <p>Завдання: ключ Q замикається.</p> <p>1. Використовуючи класичний метод розрахунку перехідних процесів, визначити струми електричного кола та напругу на котушці.</p>	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="padding: 2px 10px;">E_1, В</td><td style="padding: 2px 10px;">90</td></tr> <tr><td style="padding: 2px 10px;">E_2, В</td><td style="padding: 2px 10px;">50</td></tr> <tr><td style="padding: 2px 10px;">R_1 Ом</td><td style="padding: 2px 10px;">60</td></tr> <tr><td style="padding: 2px 10px;">R_2 Ом</td><td style="padding: 2px 10px;">20</td></tr> <tr><td style="padding: 2px 10px;">R_3, Ом</td><td style="padding: 2px 10px;">100</td></tr> <tr><td style="padding: 2px 10px;">R_4, Ом</td><td style="padding: 2px 10px;">50</td></tr> <tr><td style="padding: 2px 10px;">R_5, Ом</td><td style="padding: 2px 10px;">80</td></tr> <tr><td style="padding: 2px 10px;">L_1, Гн</td><td style="padding: 2px 10px;">0.4</td></tr> </table>	E_1 , В	90	E_2 , В	50	R_1 Ом	60	R_2 Ом	20	R_3 , Ом	100	R_4 , Ом	50	R_5 , Ом	80	L_1 , Гн	0.4
E_1 , В	90																
E_2 , В	50																
R_1 Ом	60																
R_2 Ом	20																
R_3 , Ом	100																
R_4 , Ом	50																
R_5 , Ом	80																
L_1 , Гн	0.4																
 <p style="text-align: center;">Рисунок В.2</p>																	

Варіант №3

Завдання: ключ Q розмикається.

1. Використовуючи операторний метод розрахунку перехідних процесів, визначити струми електричного кола та напругу на котушці.

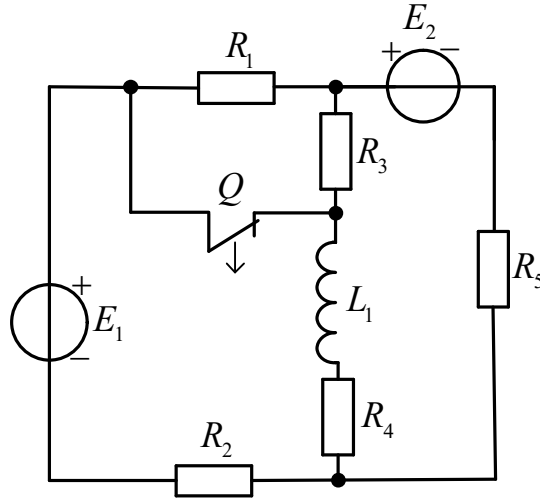


Рисунок В.3

E_1 , В	100
E_2 , В	200
R_1 , Ом	10
R_2 , Ом	20
R_3 , Ом	30
R_4 , Ом	40
R_5 , Ом	50
L_1 , Гн	0.1

Варіант №4

Завдання: ключ Q замикається.

1. Використовуючи класичний метод розрахунку перехідних процесів, визначити струми електричного кола та напругу на конденсаторі.

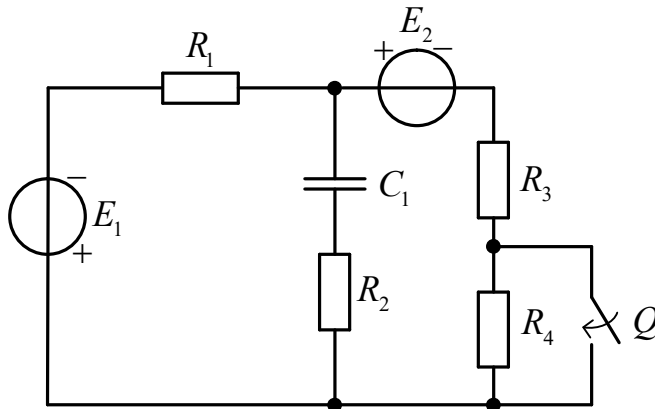


Рисунок В.4

E_1 , В	30
E_2 , В	100
R_1 , Ом.	40
R_2 , Ом	100
R_3 , Ом	200
R_4 , Ом	50
C_1 , мкФ	100

Варіант №5

Завдання: ключ Q розмикається.

1. Використовуючи операторний метод розрахунку перехідних процесів, визначити струми електричного кола та напругу на котушці.

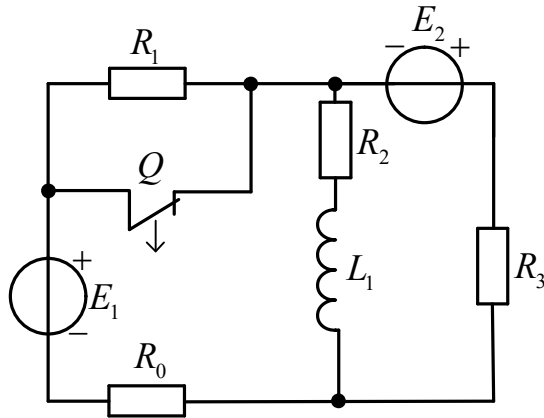


Рисунок В.5

E_1 , В	100
E_2 , В	80
R_0 Ом	2
R_1 Ом	40
R_2 , Ом	100
R_3 , Ом	60
L_1 , Гн	0.1