

Міністерство освіти і науки України

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АВТОМОБІЛЬНО-
ДОРОЖНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

Робоча програма та методичні вказівки
до розрахунково-графічної роботи
для студентів денної та заочної форм навчання
за напрямом підготовки 151 – Автоматизація та
комп'ютерно-інтегровані технології

Харків 2018

Укладачі: Рожкова С. Е.
 Рожков П. П.

Кафедра автомобільної електроніки

Розрахунково-графічна робота з курсу “Електротехніка та електромеханіка” виконується студентами за напрямом підготовки 151 – Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології.

Метою розрахунково-графічної роботи є перевірка якості засвоєння студентами відповідних розділів курсу й отримання студентами практичних навичок щодо розрахунку складних електричних кіл постійного та змінного струмів. Приступати до виконання роботи слід після вивчення необхідного матеріалу та вирішення достатньої кількості задач з рекомендованої літератури.

Розрахунково-графічна робота виконується на підставі завдання у відповідності з варіантом, який визначається двома останніми цифрами залікової книжки. Якщо дві останні цифри більші за 50, то для визначення номера варіанту потрібно відняти число 50. Якщо передостання цифра шифру – нуль, студент виконує варіант, який визначається останньою цифрою шифру.

Завдання складається з трьох задач. На початку кожної задачі слід навести короткий зміст завдання, розрахункову схему та вхідні дані відповідно до заданого варіанту. Рисунки, схеми та графіки мають бути виконані акуратно. Графіки обов’язково слід креслити у масштабі. На осях координат необхідно вказати відповідні значення й одиниці вимірювання.

При оформленні розрахунково-графічної роботи треба надавати необхідні розрахункові формули. В ході вирішення задачі треба давати короткі текстові пояснення, обов’язково наводити розмірність усіх знайдених при розрахунку значень. Результати обчислення записувати з точністю до третьої значущої цифри. Дозволяється оформлення роботи як в рукописному варіанті, так и за допомогою комп’ютера.

На титульному листі роботи слід указати назву університету та факультету, прізвище, ініціали та шифр студента або номер варіанта. У кінці роботи необхідно навести список використаної літератури.

РОБОЧА НАВЧАЛЬНА ПРОГРАМА

Навчальна дисципліна "Електротехніка і електромеханіка" відноситься до циклу нормативних дисциплін в галузі знань 0502 «Автоматика та управління». Напрямок підготовки 6.050202 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», професійне спрямування «Автоматизоване управління технологічними процесами», «Автоматика та автоматизація на транспорті»

ПРЕДМЕТОМ навчальної дисципліни є закони електротехніки, що застосовують в електромеханічних пристроях, комутованих в електричні кола постійного та змінного струму; перетворення даних законів щодо магнітних кіл; конструкція та принцип дії електромеханічних пристроїв.

Згідно з кваліфікаційними вимогами до спеціальності, **МЕТОЮ** навчальної дисципліни є підготування студентів у галузі електротехніки та електромеханіки.

Відповідно до мети, головними **ЗАДАЧАМИ** навчальної дисципліни є вивчення студентами основ електротехніки та електромеханіки на рівні знань, необхідних для засвоєння системи взаємозв'язаних профільюючих дисциплін; засвоєння студентами основ електротехніки та електромеханіки на рівні вмінь, достатніх для практичної діяльності за фахом; знайомство студентів з основами електротехніки та електромеханіки на рівні, що поширює професійний кругозір фахівця.

2. ІНФОРМАЦІЙНИЙ ОБСЯГ НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

Розділ 1. Лінійні та нелінійні електричні кола постійного струму

Тема 1. Предмет та мета курсу. Основні етапи розвитку електротехніки та електромеханіки. Джерела та приймачі електричної енергії.

Тема 2. Основні визначення електричних величин. Вольт-амперні характеристики. Режими роботи електричних кіл.

Тема 3. Електричні кола постійного струму. Основні закони електричних кіл. Потужність електричного струму. Рівняння енергетичного балансу в колах постійного струму.

Тема 4. Схеми з'єднання джерел і приймачів електричної енергії. Еквівалентні перетворення.

Тема 5. Основні методи розрахунку лінійних електричних кіл постійного струму. Метод законів Кірхгофа. Принцип і метод накладання. Метод контурних струмів.

Тема 6. Нелінійні електричні кола постійного струму. Загальні властивості. Розрахунок нелінійних електричних кіл при різних схемах з'єднання елементів.

Розділ 2. Однофазні і трифазні електричні кола змінного струму

Тема 1. Переваги використання електричної енергії змінного струму. Форми подання синусоїдальних електричних величин. Основні співвідношення в колах змінного струму.

Тема 2. Розрахунок електричних кіл змінного струму. Векторні діаграми. Явище резонансу. Активна, реактивна та повна потужність. Баланс потужностей в колах змінного струму.

Тема 3. Розрахунок електричних кіл змінного струму з використанням комплексних чисел. Побудова векторної діаграми напруг в комплексній площині.

Тема 4. Трифазні системи змінного струму. Основні переваги. Способи з'єднання фаз джерел та приймачів. З'єднання за схемою “зірка” з нульовим проводом та без нього.

Тема 5. Трифазні кола, з'єднані за схемою “трикутник”. Активна, реактивна та повна потужність в трифазних системах змінного струму.

Розділ 3. Електричні машини та апарати

Тема 1. Магнітне поле електричного струму. Робота електромагнітних сил. Закон повного струму. Крива намагнічування та петля гістерезису. Закон електромагнітної індукції. Явище самоіндукції та взаємоіндукції.

Тема 2. Класифікація, будова трансформаторів. Принцип роботи однофазного трансформатора. Основні співвідношення. Трифазні трансформатори, автотрансформатори, вимірювальні трансформатори.

Тема 3. Електричні машини. Класифікація. Машини постійного струму. Призначення, будова та принцип дії електричних машин постійного струму.

Тема 4. Синхронні та асинхронні машини змінного струму. Призначення, будова та принцип дії синхронного трифазного генератора.

Тема 5. Трифазні асинхронні двигуни. Призначення та принцип дії трифазних асинхронних двигунів. Основні співвідношення в асинхронних двигунах.

ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОЗРАХУНКОВО-ГРАФІЧНОЇ РОБОТИ

Звіт слід виконувати у вигляді пояснювальної записки згідно з вимогами до оформлення науково-технічних звітів та ОКР. Приклад титульного листа наведено у додатку А.

Пояснювальна записка повинна містити:

1. Вступ з оглядом галузей використання електромеханічних та електротехнічних приладів і пристроїв та інших розділів щодо програми курсу.

2. Завдання до кожного розділу, розрахункову схему та початкові дані.

3. Розрахунки з докладним пояснюванням кожного етапу розрахунків. Кожен етап перетворень має супроводжуватися графічним зображенням відповідної схеми.

4. Перевірку обчислень за допомогою балансу потужностей (на кожному етапі обчислення).

5. Перелік літератури.

6. Зміст.

ЗАВДАННЯ 1

РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРИЧНОГО КОЛА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Згідно до вхідних даних, наведених у додатку Б, розрахувати електричне коло методом накладання, тобто знайти струми у всіх гілках. Проміжні розрахунки здійснювати за допомогою методу еквівалентних перетворень. Провести перевірку кожного етапу обчислень і загального результату за допомогою балансу потужностей.

ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Електричне коло постійного струму в загальному випадку складається з джерел електричної енергії, споживачів електричної енергії, вимірювальних приладів, комутаційної апаратури, з'єднуючих дротів.

Джерело електричної енергії – це пристрій, у якому відбувається перетворення в електричну енергію інших видів енергії. Джерела електричної енергії характеризують електрорушійною силою (ЕРС), величина якої дорівнює кількості роботи з переміщення електричних зарядів і позначається літерою E , а також внутрішнім опором переміщенню електричних зарядів R_0 . У *споживачах* електричної енергії електрична енергія джерел перетворюється в механічну, теплову, хімічну та інші види енергії. В завданні розглядається приклад перетворення електричної енергії в теплову, а споживачі характеризуються електричним опором та позначаються літерою R .

Графічне зображення електричних кіл, створених з умовних позначень електротехнічних пристроїв, називається *принциповою схемою*.

Місце з'єднання на схемі трьох і більше провідників називається *вузлом*. Ділянка електричного кола між двома вузлами називається *гілкою*.

Електричним струмом називається спрямоване переміщення електричних зарядів, сила струму позначається літерою I й вимірюється в амперах (А).

Електричні заряди утворюють навколо себе поле. Енергетичною характеристикою будь-якої точки поля є *потенціал* електричного поля, який позначається літерою ϕ , вимірюється у вольтах (В). Під *напругою* на будь-якій ділянці електричного кола розуміють різницю потенціалів між точками,

що знаходяться на межах цієї ділянки. Напруга позначається літерою U , вимірюється у вольтах (В).

На рис. 1 зображена ділянка кола, яка містить опір R і не містить ЕРС.

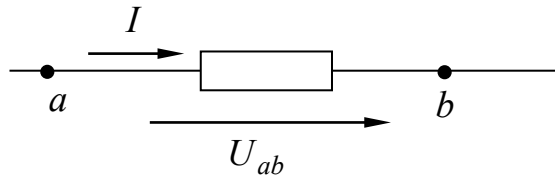


Рисунок 1 - Ділянка електричного кола з опором

Границі ділянки позначені точками a та b . Нехай струм тече від точки a до точки b . За визначенням, напруга між точками a і b дорівнює

$$U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b.$$

На ділянці кола, що не має ЕРС, струм тече від точки з більшим потенціалом до точки з меншим потенціалом. Таким чином, потенціал точки a (φ_a) більший за потенціал точки b (φ_b) на величину, що дорівнює

$$U_{ab} = IR.$$

Це співвідношення може бути записано як

$$I = \frac{U_{ab}}{R}$$

і носить назву *закону Ома*.

Контур електричного кола - це замкнутий шлях, який проходить по декількох гілках таким чином, що ні яка гілка і ні який вузол не зустрічаються більше одного разу.

Зобразимо найпростіше коло, що складається з одного контуру (рис. 2).

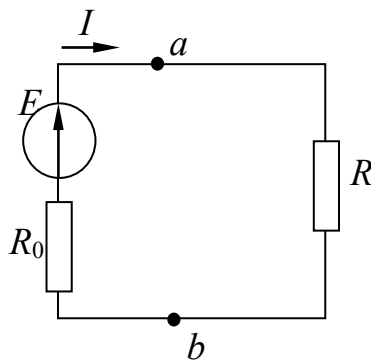


Рисунок 2 - Найпростіше електричне коло

Якщо в найпростішому електричному колі умовно перемістити будь який опір в будь яке місце, то струм, що тече в контурі, не зміниться.

Контур, зображений на рис. 2, можна зобразити іншим чином (рис. 3).

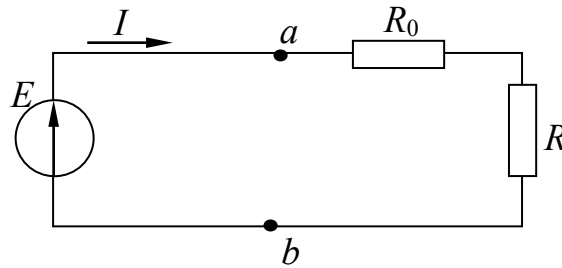


Рисунок 3 - Еквівалентний контур

Різниця потенціалів точок a і b дорівнює ЕРС; тоді можна записати закон Ома для замкнутого контуру

$$I = \frac{E}{R_0 + R}.$$

Перший закон Кірхгофа. Алгебраїчна сума струмів в електричному вузлі дорівнює нулю

$$\sum_{k=1}^n I = 0,$$

де n – кількість віток кола, з'єднаних у вузол.

Це твердження доводиться тим, що у вузлі не можуть нагромаджуватися електрони. Струми, що течуть до вузла, звичайно вважаються позитивними, а ті, що течуть від нього – негативними.

Другий закон Кірхгофа. Алгебраїчна сума ЕРС, що діють у будь-якому замкнутому контурі електричного кола, дорівнює алгебраїчній сумі напруг на окремих ділянках цього контуру

$$\sum_{k=1}^n E_k = \sum_{k=1}^m I_k R_k,$$

де n – кількість ЕРС у контурі;

m – кількість ділянок контуру, що містять опори.

ЕРС, що діють у напрямі обходу контуру, вважають додатними, а ті, що діють у протилежному напрямі – від'ємними. Напруги вважають додатними, якщо вони спричинені струмами, що течуть у напрямку обходу, і від'ємними – якщо спричинені струмами, що течуть у зворотній бік.

Правила еквівалентних перетворень.

Якщо в електричному колі є ділянка, на якій декілька опорів з'єднані послідовно один з одним (рис. 4, а), то струм на цій ділянці не зміниться, якщо усі опори замінити одним еквівалентним опором (рис. 4, б).

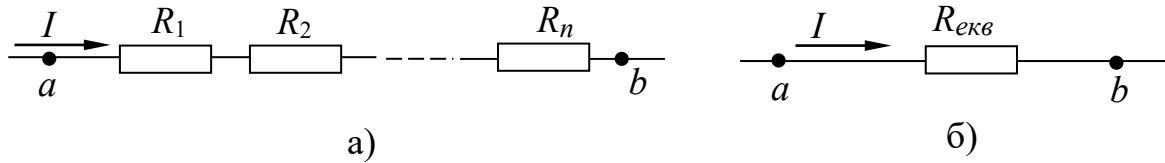


Рисунок 4 - Еквівалентне перетворення ділянки електричного кола з послідовно з'єднаними опорами

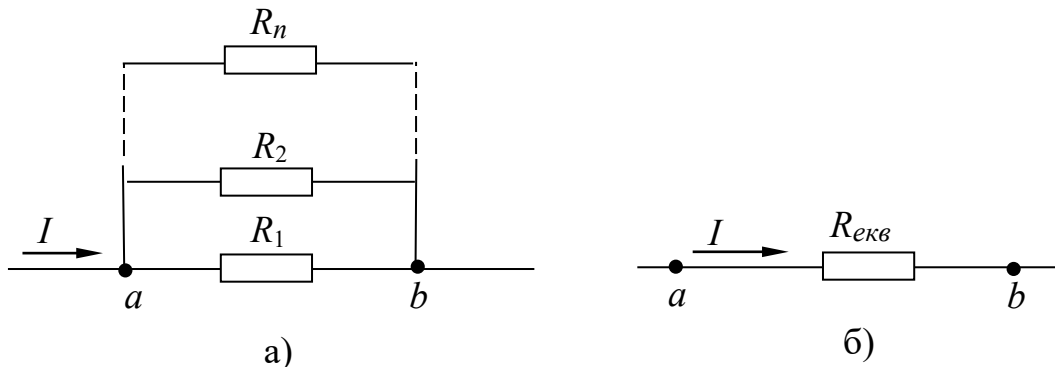


Рисунок 5 - Еквівалентне перетворення ділянки електричного кола з паралельно з'єднаними опорами

Еквівалентний опір при послідовному з'єднанні елементів обчислюється за формулою

$$R_{\text{екв}} = \sum_{i=1}^n R_i.$$

Якщо в електричному колі є ділянка, на якій декілька опорів з'єднані паралельно один до одного (рис. 5, а), то струм на цієї ділянці не зміниться, якщо всі ці опори замінити на один еквівалентний (рис. 5, б).

Такий еквівалентний опір визначається за формулою

$$R_{\text{екв}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}}.$$

Якщо в електричному колі існують ділянки, що при з'єднанні утворюють зірку (рис. 6, а) або трикутник (рис. 6, б), то потенціали відповідних вузлів та струм, який тече у них, не зміниться, якщо будуть виконуватись наступні співвідношення

$$R_A = \frac{R_{AB} \cdot R_{CA}}{R_{AB} + R_{BC} + R_{CA}}; R_B = \frac{R_{BC} \cdot R_{AB}}{R_{AB} + R_{BC} + R_{CA}}; R_C = \frac{R_{CA} \cdot R_{BC}}{R_{AB} + R_{BC} + R_{CA}},$$

$$R_{AB} = R_B + R_C + \frac{R_A \cdot R_B}{R_C}; R_{BC} = R_B + R_C + \frac{R_B \cdot R_C}{R_A}; R_{CA} = R_B + R_C + \frac{R_C \cdot R_A}{R_B}.$$

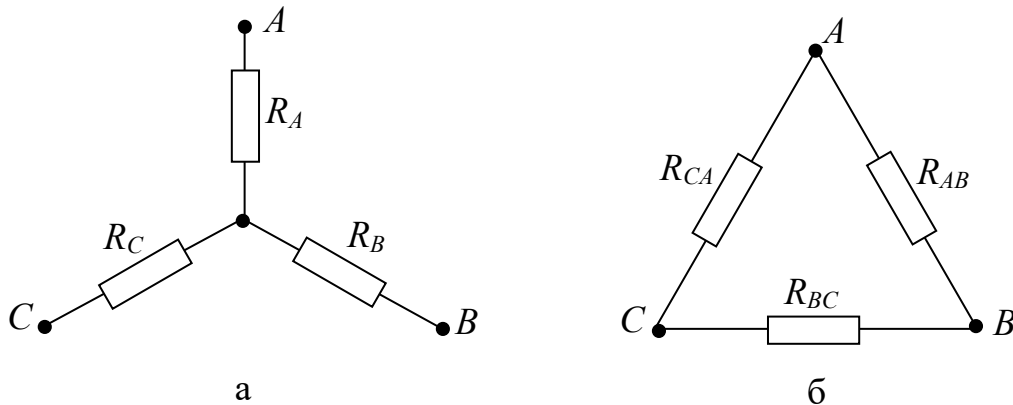


Рисунок 6 - Схеми з'єднання опорів: а – зіркою, б - трикутником

У деяких випадках струм розгалужується у вузлі по двох гілках так, як зображено на рис. 7.

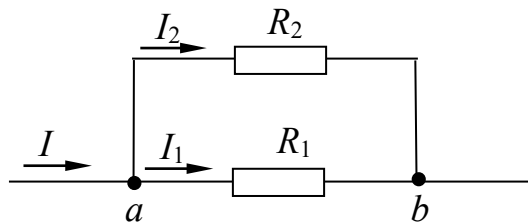


Рисунок . 7. Паралельне з'єднання двох гілок

У цьому випадку струми у гілках зручно обчислювати за формулами

$$I_1 = I \frac{R_2}{R_1 + R_2}; \quad I_2 = I \frac{R_1}{R_1 + R_2}.$$

Принцип та метод накладання. У лінійних електричних колах постійного струму з джерелами ЕРС та опорами, відповідно до принципу

накладання, струм у будь-якій гілці дорівнює алгебраїчній сумі струмів у цій гілці (часткових струмів) при дії кожного джерела окремо.

На цьому принципі оснований метод накладання, який полягає у тому, що при розрахунку кожної часткової схеми залишають лише одне джерело ЕРС, інші джерела замінюють опорами, які дорівнюють внутрішнім опорам відповідних джерел ЕРС.

Для проведення розрахунку й аналізу необхідно знати не тільки значення заданих ЕРС, напруг або струмів, але і їхні напрямки, тому що останні визначають знаки доданків у розрахункових виразах.

За напрямком струму приймають напрямком прямування позитивних зарядів. За напрямком напруги між двома точками електричного кола приймають напрямком від більшого потенціалу до меншого. За напрямком ЕРС між виводами джерела приймають напрямком від меншого потенціалу до більшого.

При розрахунках електричних кіл дійсні напрямки токів в елементах кола в загальному випадку невідомі. Тому необхідно попередньо вибрати умовні позитивні напрямки струмів у всіх елементах кола. Якщо в результаті розрахунку електричного кола при обраних умовних позитивних напрямках струм у даному елементі буде позитивним, то дійсний напрямок току збігається з обраним позитивним. У протилежному випадку дійсний напрямок є протилежним обраному. Умовний позитивний напрямок напруги на елементі схеми електричного кола також вибирається довільно (як правило, збігається з напрямком струму).

Розрахунок електричного кола методом накладання провадиться в такому порядку:

1. З електричного кола видаляють усі джерела ЕРС, крім одного, замінюючи їх внутрішніми опорам.

2. Зберігаючи в електричному колі усі опори, у тому числі і внутрішні опори джерел, виконують розрахунок електричного кола, тобто визначають струми в усіх гілках кола.

3. Подібні розрахунки повторюють стільки разів, скільки джерел ЕРС є у даному електричному колі.

4. Дійсний струм кожної гілки від дії всіх джерел визначають як алгебраїчну суму відповідних часткових струмів, з урахуванням їхніх напрямків. При цьому як позитивні приймають напрямки струмів першої часткової схеми. Якщо результуючий струм у гілці з'явиться негативним, це означає, що дійсний напрямок є протилежним тому, що є у першій частковій схемі.

При розрахунках часткових схем допускається заміна напрямку джерела на протилежний. Однак у цьому випадку після розрахунку часткових струмів слід поміняти напрям ЕРС, а також напрями всіх струмів у розглянутій частковій схемі на протилежні.

У будь-якому електричному колі має зберігатися енергетичний баланс - баланс потужностей: алгебраїчна сума потужностей, вироблених усіма джерелами енергії в електричному колі, дорівнює арифметичній сумі потужностей, спожитих усіма приймачами енергії, і втрат потужності на внутрішніх опорах джерел

$$\sum P_{дж} = \sum P_{пр} + \sum \Delta P,$$

або

$$\sum EI = \sum RI_R^2 + \sum R_0 I^2,$$

де $P_{дж}$ - потужність, яка генерується джерелом ЕРС;

$P_{пр}$ - потужність, споживана приймачем (включно внутрішні опори джерел ЕРС);

ΔP - втрати потужності на внутрішньому опорі джерела.

Потужність джерела ЕРС треба вважати позитивною і записувати в рівняння балансу потужностей зі знаком плюс, якщо позитивний напрямок струму збігається з напрямком дії ЕРС. У протилежному випадку цю потужність треба вважати негативною і записувати зі знаком мінус.

ПРИКЛАД РОЗРАХУНКУ

Визначити струми у гілках електричного кола, зображеного на рис. 8, методом накладання згідно з наведеними вхідними даними. Для перевірки правильності розрахунку скласти баланс потужностей.

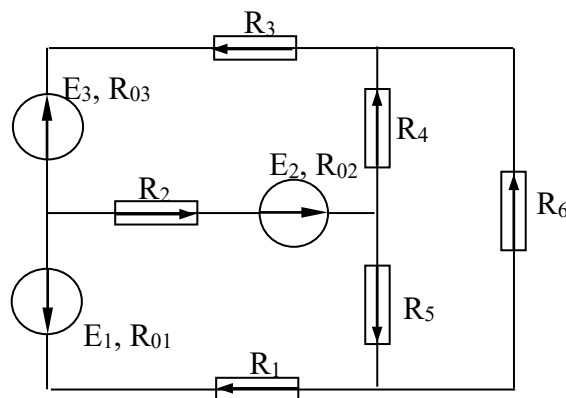


Рисунок 8 - Розрахункова електрична схема

Вхідні дані:

$E_1=7$ В;

$E_2=19$ В;

$E_3=3$ В;

$R_{01}=0$ Ом;

$R_{02}=0,8$ Ом ;

$R_{03}=1,2$ Ом;

$$R_1=4 \text{ Ом};$$

$$R_4=4 \text{ Ом};$$

$$R_2=6 \text{ Ом};$$

$$R_5=3 \text{ Ом};$$

$$R_3=4 \text{ Ом};$$

$$R_6=3 \text{ Ом}.$$

Розв'язання

Оскільки внутрішній опір ЕРС та опір гілки, що містить ЕРС, включені послідовно, то можна прийняти, що

$$R_1 = R_1 + R_{01} = 4 \text{ Ом};$$

$$R_2 = R_2 + R_{02} = 6,8 \text{ Ом};$$

$$R_3 = R_3 + R_{03} = 5,2 \text{ Ом}.$$

Видозмінимо схему в більш зручну для розрахунку (рис.9). Кожне джерело електричної енергії перемістимо у межах гілки до вузла "4" і визначимо такий напрям, щоб потенціал четвертого вузла можна було прийняти рівним 0.

Визначаємо опори еквівалентної зірки

$$R_{56} = \frac{R_5 \cdot R_6}{R_4 + R_5 + R_6} = 0,9 \text{ Ом};$$

$$R_{45} = \frac{R_4 \cdot R_5}{R_4 + R_5 + R_6} = 1,2 \text{ Ом};$$

$$R_{46} = \frac{R_4 \cdot R_6}{R_4 + R_5 + R_6} = 1,2 \text{ Ом}.$$

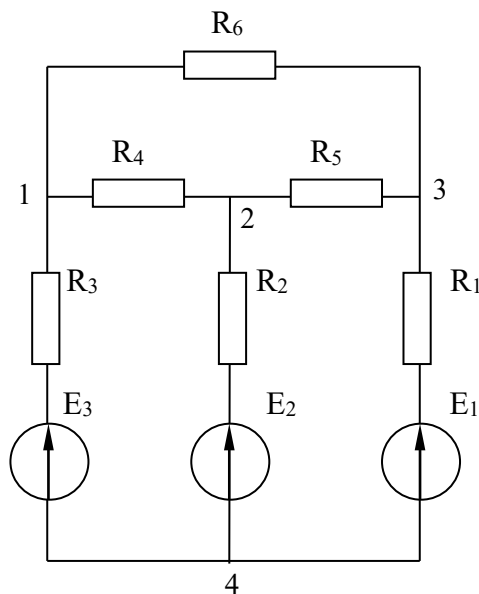


Рисунок 9 - Спрощена розрахункова схема

Для знаходження еквівалентного опору кожної часткової схеми необхідно перетворити трикутник опорів в еквівалентну зірку (рис. 10).

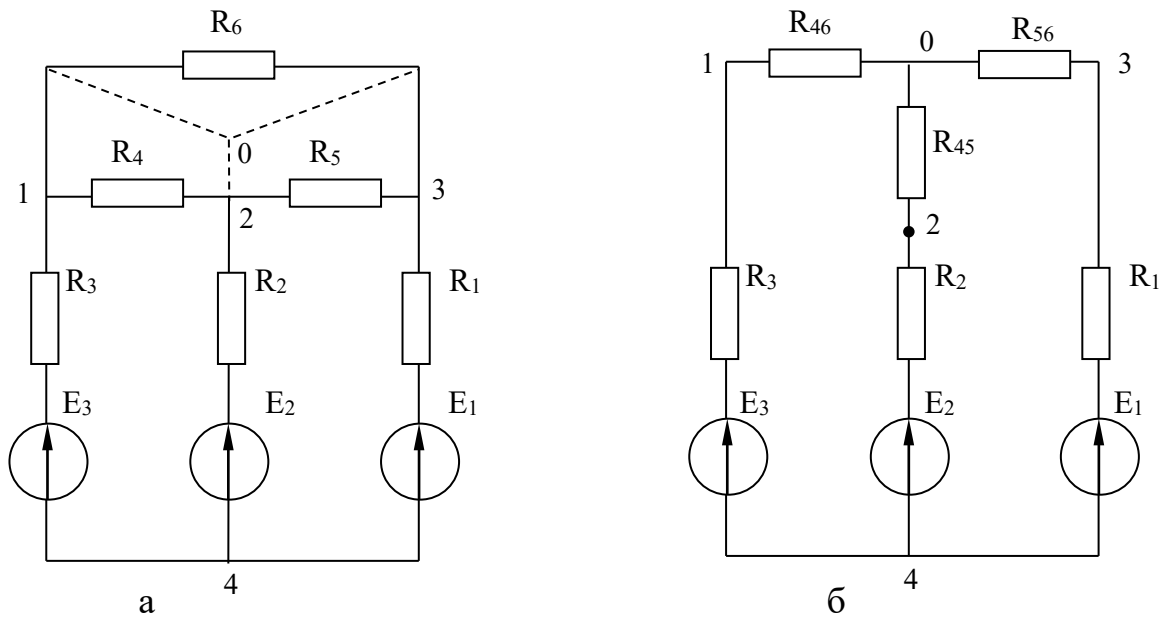


Рисунок 10 - Перетворення трикутника опорів (а) в еквівалентну зірку (б)

1. Розглянемо першу часткову схему (рис.11), видаливши дві ЕРС і залишивши одну (E_3).

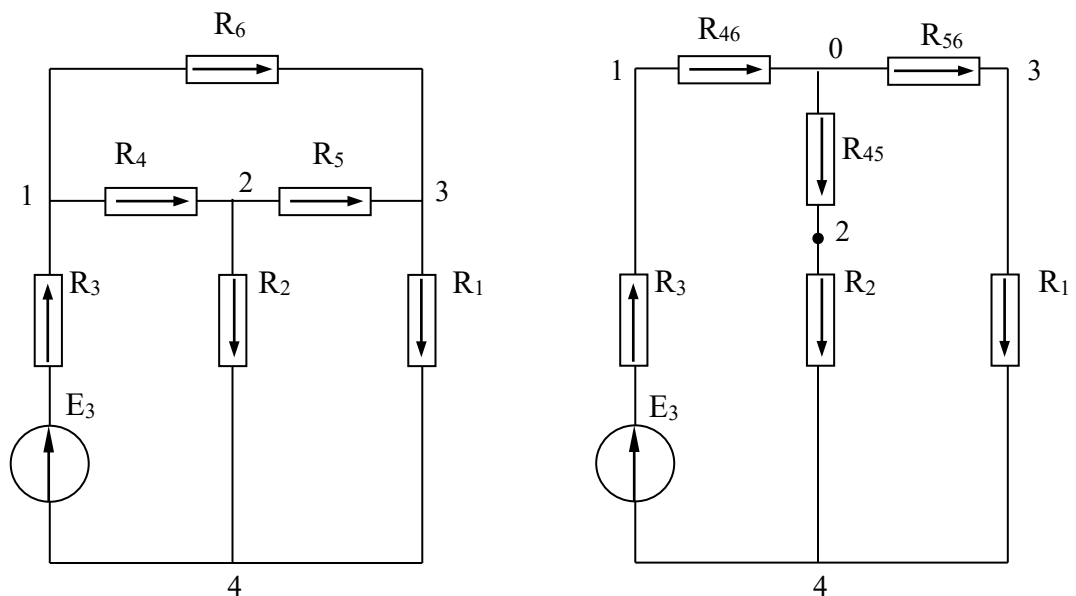


Рисунок 11 - Перша часткова схема

Знайдемо еквівалентний (загальний) опір перетвореного кола (рис. 12).

$$R_{0-1-4} = R_3 + R_{46} = 5,2 \text{ Ом};$$

$$R_{0-2-4} = R_2 + R_{45} = 8 \text{ Ом};$$

$$R_{0-3-4} = R_1 + R_{56} = 4,9 \text{ Ом};$$

$$R_{0-4} = \frac{R_{0-3-4} R_{0-2-4}}{R_{0-3-4} + R_{0-2-4}} = 3,039 \text{ Ом};$$

$$R_{\text{екв}} = R_{0-1-4} + R_{0-4} = 9,439 \text{ Ом}.$$

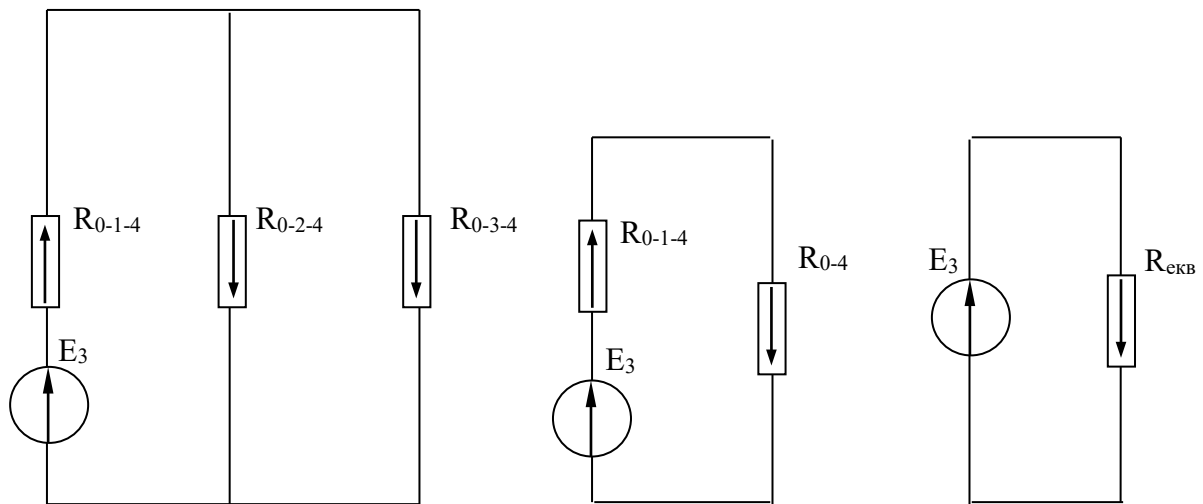


Рисунок 12 - Еквівалентні перетворення першої часткової схеми

Визначивши еквівалентний опір, можна знайти струм через E_3 (I'_3) і через опори R_2 і R_1

$$I'_3 = \frac{E_3}{R_{\text{екв}}} = 0,318 \text{ А};$$

$$I'_2 = I'_3 \cdot \frac{R_{0-3-4}}{R_{0-2-4} + R_{0-3-4}} = 0,121 \text{ А};$$

$$I'_1 = I'_3 \cdot \frac{R_{0-2-4}}{R_{0-2-4} + R_{0-3-4}} = 0,197 \text{ А}.$$

Знайдемо потенціали вузлів 1, 2, 3 і 4

$$\varphi_1 = E_3 - I'_3 R_3 = 1,347 \text{ В};$$

$$\varphi_2 = \varphi_1 - I'_3 \cdot R_{46} - I'_2 R_{45} = 0,821 \text{ В};$$

$$\varphi_3 = \varphi_1 - I'_3 \cdot R_{46} - I'_1 R_{56} = 0,788 \text{ В};$$

$$\varphi_4 = 0 \text{ В}.$$

Визначивши напруги (різниці потенціалів), знайдемо струми I'_4 , I'_5 , I'_6 через опори R_4 , R_5 і R_6 відповідно

$$U_{23} = \varphi_2 - \varphi_3 = 0,033 \text{ В}; \quad I'_5 = \frac{U_{23}}{R_5} = 0,011 \text{ А};$$

$$U_{13} = \varphi_1 - \varphi_3 = 0,559 \text{ В}; \quad I'_6 = \frac{U_{13}}{R_6} = 0,186 \text{ А};$$

$$U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 = 0,526 \text{ В}; \quad I'_4 = \frac{U_{12}}{R_4} = 0,132 \text{ А}.$$

За результатами розрахунку проставимо напрями струмів на першій частковій схемі (рис.11).

Для перевірки правильності розрахунку першої часткової схеми складемо баланс потужностей

$$P_{дж} = E_3 I'_3 = 0,954 \text{ Вт};$$

$$P_{пр} = (I'_1)^2 R_1 + (I'_2)^2 R_2 + (I'_3)^2 R_3 + (I'_4)^2 R_4 + (I'_5)^2 R_5 + (I'_6)^2 R_6 = 0,95 \text{ Вт}.$$

Баланс потужностей збігається, похибка

$$\delta = \frac{P_{дж} - P_{пр}}{P_{дж}} \cdot 100 = 0,05\%$$

не перевищує припустимого значення ($\delta \leq 0,05\%$). Тому можна зробити висновок, що розрахунок виконано правильно.

2. Розраховуємо другу часткову схему з включеною E_2 і відключеними E_1 і E_3 , а далі – третю, відповідно з включеним джерелом E_1 і відключеними E_3 і E_2 . Розрахунки проводимо аналогічно розрахунку першої часткової схеми.

За результатами розрахунку у кожній схемі проставляємо напрями струмів і складаємо баланс потужностей. У випадку, коли баланс потужностей не збігається, необхідно перерахувати поточну часткову схему більш ретельно.

3. Визначаємо дійсні загальні струми у гілках вхідної схеми. Для цього проставимо напрямки розрахованих часткових струмів у схемах згідно напрямам ЕРС, які відповідають вхідним даним (рис.13). Не слід забувати замінити напрями струмів на протилежні, якщо ви змінювали напрям ЕРС у частковій схемі.

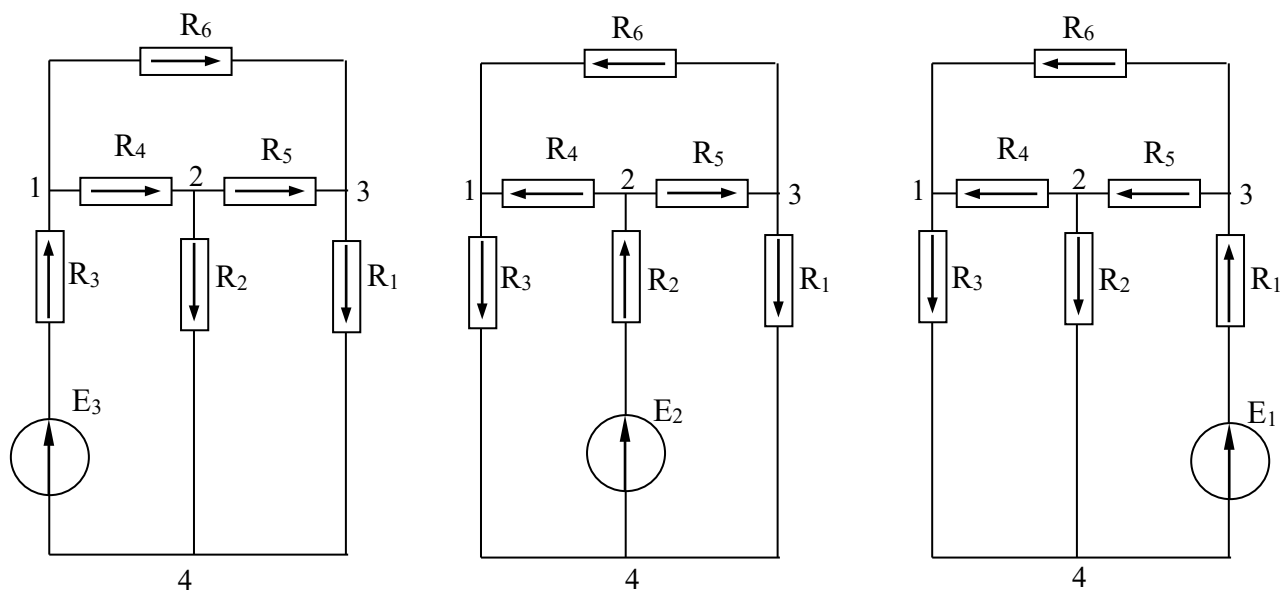


Рисунок 13 - Напрями струмів у часткових схемах

Таблиця часткових, а також результатів обчислення загальних струмів наведені у табл. 1. Знаки часткових струмів в алгебраїчній сумі визначаються відносно напрямків струмів першої часткової схеми.

Таблиця 1

Таблиця часткових та загальних струмів

Перші часткові струми, А	Другі часткові струми, А	Треті часткові струми, А	Загальні струми, А
$I'_1 = 0,197$	$I''_1 = 0,999$	$I'''_1 = 0,828$	$I_1 = I'_1 + I''_1 - I'''_1 = 0,368$
$I'_2 = 0,121$	$I''_2 = 1,763$	$I'''_2 = 0,368$	$I_2 = I'_2 - I''_2 + I'''_2 = - 1,275$
$I'_3 = 0,318$	$I''_3 = 0,765$	$I'''_3 = 0,46$	$I_3 = I'_3 - I''_3 - I'''_3 = - 0,907$
$I'_4 = 0,132$	$I''_4 = 0,758$	$I'''_4 = 0,028$	$I_4 = I'_4 - I''_4 - I'''_4 = - 0,654$
$I'_5 = 0,011$	$I''_5 = 1,005$	$I'''_5 = 0,396$	$I_5 = I'_5 + I''_5 - I'''_5 = 0,62$
$I'_6 = 0,186$	$I''_6 = 0,006$	$I'''_6 = 0,432$	$I_6 = I'_6 - I''_6 - I'''_6 = - 0,252$

На вхідній схемі (рис.8) проставимо напрямки дійсних загальних струмів у гілках кола і складемо загальний баланс потужностей для перевірки правильності розрахунку

$$P_{дж} = -E_1 I_1 + E_2 I_2 - E_3 I_3 = 18,922 \text{ Вт};$$

$$P_{\Pi} = (I_1)^2 R_1 + (I_2)^2 R_2 + (I_3)^2 R_3 + (I_4)^2 R_4 + (I_5)^2 R_5 + (I_6)^2 R_6 = 18,92 \text{ Вт.}$$

Баланс потужностей зійшовся. Отже, розрахунок виконаний правильно.

Наведений приклад розрахунку має загальний характер. Відповіді на запитання, які можуть виникнути під час виконання розрахунково-графічної роботи, можна знайти у рекомендованій літературі, що наведена у списку.

ЗАПИТАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ

1. Яке з'єднання опорів називають послідовним, паралельним, змішаним?
2. Сформулюйте закон Ома та запишіть його для ділянки кола, для замкнутого кола.
3. Сформулюйте закони Кірхгофа та запишіть їх в алгебраїчному виді.
4. Викладіть принцип накладання та послідовність розрахунку електричного кола методом накладання.
5. Викладіть зміст методів розрахунку електричних кіл з кількома джерелами: метод безпосереднього використання законів Кірхгофа та метод контурних струмів.

ЗАВДАННЯ 2

РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРИЧНОГО КОЛА ЗМІННОГО СТРУМУ

Для електричного кола, за даними додатку В, визначити струми у гілках кола та напруги на окремих ділянках за допомогою методу комплексних чисел. Скласти баланс активної та реактивної потужностей. Побудувати векторну діаграму струмів і напруг. Визначити потужність, яка вимірюється ватметром.

ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Змінним струмом називається електричний струм, розмір і напрямок якого змінюються у часі.

У промисловості широко використовується змінний струм, що змінюється за законом синуса

$$i = I_m \cdot \sin(\omega t + \psi),$$

де i - миттєве значення струму, тобто значення струму в даний момент часу;

I_m - максимальне значення струму;

ω - кутова частота змінного струму;

ψ - початкова фаза змінного струму, що визначає значення струму при $t=0$;

$(\omega t + \psi)$ - повна фаза, що визначає значення струму у даний момент часу.

Кутова частота визначається за формулою

$$\omega = 2\pi / T = 2\pi f ,$$

де T - період змінного струму;

$f=1/T$ - частота змінного струму.

Промислова частота змінного струму дорівнює $f = 50\text{Гц}$.

В електриці частіше користуються не амплітудним, а діючим значенням електричних величин. *Діючим значенням* називається такий незмінний у часі струм, при якому на активному опорі за період T виділяється та ж кількість енергії, що і при дійсному синусоїдальному струмі. Амплітудне та діюче значення зв'язані співвідношенням

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} .$$

Нехай у електричному колі при напрузі на її затискачах $u = U_m \sin(\omega t + \psi_u)$ тече струм $i = I_m \sin(\omega t + \psi_i)$. Різниця початкових фаз напруги ψ_u та струму ψ_i називається *кутом зсуву фаз*

$$\varphi = \psi_u - \psi_i .$$

Якщо $\psi_u > \psi_i$, то напруга випереджає за фазою струм. Якщо $\psi_u < \psi_i$, то напруга відстає за фазою від струму.

При розрахунку кола синусоїдального струму потрібно здійснювати різні математичні операції, які зручно виконувати з діючими значеннями струмів і напруг, розглядаючи їх як вектори. Значення векторів у цьому випадку дорівнюють діючим струмам і напругам, а початкова фаза визначає положення вектора відносно позитивної горизонтальної осі координат. При позитивній (що випереджає) початковій фазі вектор обернений на відповідний кут проти руху стрілки годинника, а при негативній (що відстає) - у напрямку руху стрілки годинника.

Якщо в системі координат xOy (рис. 10) помістити вектор, довжина якого дорівнює максимальному значенню струму, під кутом ψ до осі Ox , то проекція цього вектора на вісь Oy дорівнює значенню змінного струму в момент $t = 0$.

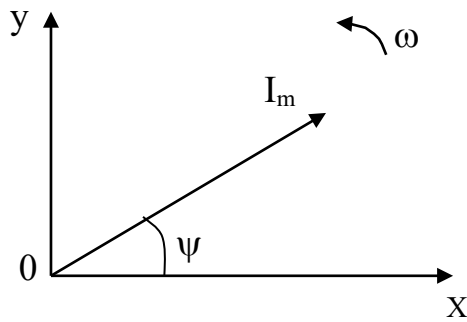


Рисунок 10 - Зображення струму у системі координат

Якщо уявити, що починаючи з моменту часу $t=0$ вектор обертається проти годинникової стрілки з кутовою швидкістю ω , рівною кутовій частоті змінного струму, то проекція цього вектора на вісь Ox дорівнює миттєвому значенню струму

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi_i).$$

Практично осі координат не зображують, а приймають один вектор за вихідний і будують інші вектори відносно вихідного вектору, з урахуванням зсуву фаз, тобто будують векторну діаграму. *Векторною діаграмою* називають сукупність векторів, що зображають синусоїдальні ЕРС, напруги та струми однієї частоти, які виходять із загальної точки.

Наприклад, якщо $u = U_m \sin(\omega \cdot t + \varphi)$, а $i = I_m \sin \omega t$, то можна зобразити їх векторами так, як показано на рис.11.

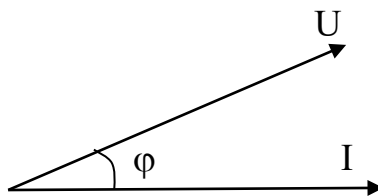


Рисунок 11 - Векторна діаграма

На рис. 11 довжини векторів пропорційні діючим значенням.

У колі змінного струму існують три види елементів електричного кола: резистивний, індуктивний та ємнісний.

Резистивний елемент – це елемент електричного кола змінного струму, у якому відбувається необоротне перетворення електричної енергії в інші

види енергії. Основним параметром резистивного елементу є активний опір R .

Індуктивний елемент - це елемент електричного кола, у якому відбувається оборотне перетворення електричної енергії в енергію магнітного поля. Індуктивний елемент характеризується величиною індуктивності L .

Ємнісний елемент є елементом електричного кола змінного струму, у якому відбувається тимчасове оборотне накопичування електричної енергії. Ємнісний елемент характеризується величиною ємності C .

Для практичних розрахунків зручніше виражати вектори струму та напруги, а також опори та провідності комплексними числами, в яких активні складові є дійсними значеннями, а реактивні - уявними. При цьому знак уявного значення залежить від характеру реактивної складової.

У разі розрахунку електричних кіл змінного струму за допомогою комплексних чисел можуть бути використані ті ж самі аналітичні співвідношення і методи розрахунку, що й при розрахунку кіл постійного струму.

Щоб представити задану в тригонометричній формі синусоїдальну величину

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi)$$

з початковою фазою ψ комплексним числом, зобразимо її на комплексній площині (рис.12).

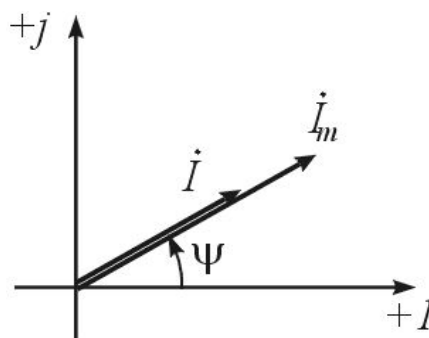


Рисунок 12 - Зображення синусоїдальної величини на комплексній площині

Величина j - це штучно введена величина, $j = \sqrt{-1}$.

З початку координат під кутом ψ до осі дійсних величин побудуємо вектор, довжина якого в масштабі чисельно дорівнює значенню I_m . Кінець цього вектора знаходиться в точці, якій відповідає комплексне число, рівне комплексній амплітуді синусоїдального струму

$$I_m = I_m e^{j\psi}.$$

Довжина вектору на комплексній площині в масштабі дорівнює дійсному значенню синусоїдального струму

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = I e^{j\psi}.$$

Застосовується три форми запису комплексного значення синусоїдальної величини:

- показова

$$I = I e^{j\psi};$$

- тригонометрична

$$I = I \cos \psi + j I \sin \psi;$$

- алгебраїчна

$$I = I' + jI'',$$

де $I' = I \cos \psi$ - дійсна складова комплексного значення синусоїдального струму;

$I'' = I \sin \psi$ - уявна складова комплексного значення синусоїдального струму;

$I = \sqrt{(I')^2 + (I'')^2}$ - модуль комплексного числа;

$\psi = \arctg \frac{I''}{I'}$ - аргумент комплексного числа.

Перехід від показової форми до тригонометричної виконується за допомогою формули Ейлера

$$e^{j\psi} = \cos \psi + j \sin \psi.$$

Розглянемо закон Ома для елементів електричного кола синусоїдального струму.

1. Резистивний елемент (рис. 13).

Виберемо позитивний напрямок синусоїдального струму

$$i_R = I_{\text{rm}} \sin(\omega t + \psi_i)$$

у резистивному елементі з постійним опором R таким, що співпадає з позитивним напрямком синусоїдальної напруги, прикладеної до елемента.

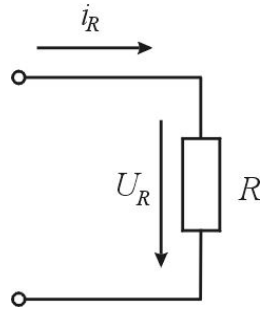


Рисунок 13 - Резистивний елемент

У цьому випадку, за законом Ома, для миттєвих значень напруги й струму справедливе співвідношення

$$u_R = Ri_R$$

або

$$u_R = RI_{\text{rm}} \sin(\omega t + \psi_i) = U_{\text{rm}} \sin(\omega t + \psi_u),$$

у якому амплітуди зв'язані співвідношенням $U_{\text{rm}} = RI_{\text{rm}}$, а їхні початкові фази однакові $\psi_u = \psi_i$.

У комплексній формі струм і напруга мають вигляд

$$\dot{I}_R = I_R e^{j\psi_i}; \quad \dot{U}_R = U_R e^{j\psi_u}.$$

Векторна діаграма зображена на рис.14.

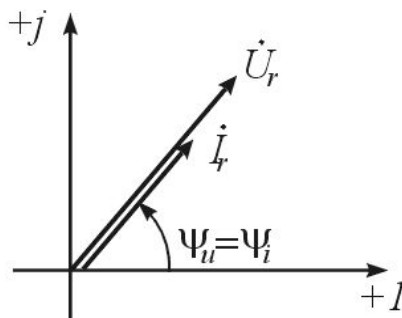


Рисунок 14 - Векторна діаграма струму і напруги на резистивному елементі

Закон Ома в комплексній формі має вигляд

$$\dot{U}_R = R\dot{I}_R.$$

Як видно із співвідношення, на активному опорі струм і напруга збігаються за фазою.

2. Індуктивний елемент (рис.15).

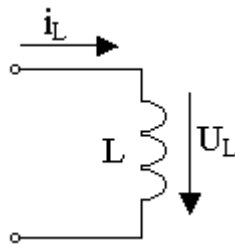


Рисунок 15 - Індуктивний елемент

Синусоїдальний струм в індуктивному елементі дорівнює

$$i_L = I_{Lm} \sin(\omega t + \psi_i).$$

За законом електромагнітної індукції при протіканні струму з'явиться напруга

$$u_L = L \frac{di_L}{dt} = \omega L I_{Lm} \cos(\omega t + \psi_i) = U_{Lm} \sin(\omega t + \psi_i + \frac{\pi}{2}) = U_{Lm} \sin(\omega t + \psi_u).$$

Амплітуди напруги і струму зв'язані співвідношенням $U_{Lm} = \omega L I_{Lm}$, а їхні початкові фази – співвідношенням $\psi_u = \psi_i + \frac{\pi}{2}$.

Для діючих значень одержимо вирази, розділивши амплітуди на $\sqrt{2}$

$$U_L = \omega L I_L = x_L I_L,$$

де $x_L = \omega L$ - індуктивний реактивний опір.

Векторна діаграма має вигляд, як на рис. 16.

Вектор напруги випереджає вектор струму на кут зсуву фаз $\varphi = \frac{\pi}{2}$.

Представимо струм і напругу в комплексній формі

$$\dot{I}_L = I_L e^{j\psi_i} \quad \text{та} \quad \dot{U}_L = U_L e^{j\psi_u}.$$

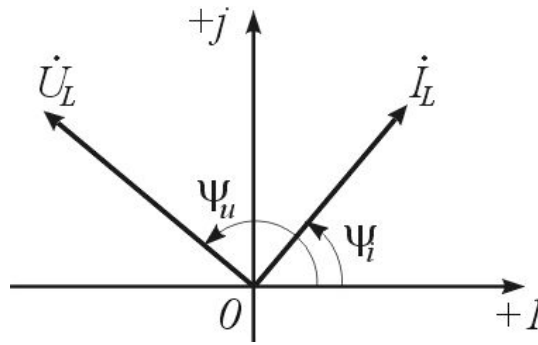


Рисунок 16 - Векторна діаграма струму й напруги на індуктивному елементі

Закон Ома в комплексній формі має вигляд

$$\dot{U}_L = \omega L I_L e^{j\psi_u} = \omega L I_L e^{j(\psi_i + \pi/2)},$$

або

$$\dot{U}_L = j\omega L \dot{I}_L = jx_L \dot{I}_L,$$

де $jx_L = j\omega L$ – комплексний опір індуктивного елемента.

3. Ємнісний елемент (рис. 17).

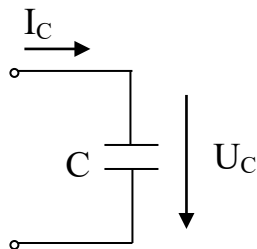


Рисунок 17 - Ємнісний елемент

Якщо напруга між виходами ємнісного елемента змінюється по синусоїдальному закону

$$u_c = U_{cm} \sin(\omega t + \psi_u),$$

то синусоїдальний струм на ньому дорівнює

$$i_c = C \frac{du_c}{dt} = \omega C U_{cm} \cos(\omega t + \psi_u) = I_{cm} \sin\left(\omega t + \psi_u + \frac{\pi}{2}\right) = I_{cm} \sin(\omega t + \psi_i),$$

де амплітуди зв'язані співвідношенням $I_{cm} = \omega C U_{cm}$, а початкові фази $\psi_i = \psi_u + \frac{\pi}{2}$.

Для діючих значень відповідно

$$U_c = \frac{1}{\omega C} I_c = x_c I_c,$$

Векторна діаграма має вигляд, як на рис. 18. Напруга відстає по фазі від струму на кут $\varphi = \psi_i - \psi_u = \frac{\pi}{2}$.

Представимо струм і напругу в комплексній формі

$$\dot{I} = I_c e^{j\psi_i};$$

$$\dot{U}_c = U_c e^{j\psi_u}.$$

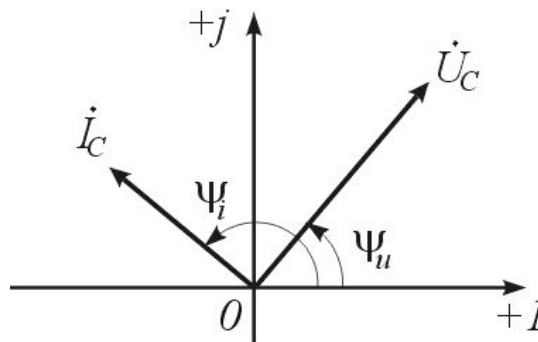


Рисунок 18 - Векторна діаграма напруги та струму на ємнісному елементі

Закон Ома в комплексній формі для ємнісного елемента має вигляд

$$\dot{U}_c = \frac{1}{\omega C} \dot{I}_c;$$

$$\dot{U}_c = \frac{1}{\omega C} \dot{I}_c = -j x_c \dot{I}_c,$$

де $\frac{1}{j\omega C} = -j x_c$ - комплексний опір ємнісного елемента.

Електричні процеси в резистивних, індуктивних й ємнісних елементах різні за фізичною природою. У резистивних елементах відбувається

необоротне перетворення електричної енергії в інші види енергії. Середня швидкість необоротного процесу перетворення енергії в резистивному елементі визначається активною потужністю P .

В індуктивному й ємнісному елементах відбувається періодичне акумулювання енергії в магнітному і електричному полях, а потім енергія повертається в зовнішню щодо цих елементів частину кола. У таких елементах не відбувається необоротного перетворення електричної енергії в інші види, тобто активна потужність P дорівнює нулю. Енергетичні процеси в індуктивному і ємнісному елементах визначаються реактивною індуктивною потужністю Q_L і реактивною ємнісною потужністю Q_C .

Повна потужність кола змінного струму дорівнює добутку діючих значень напруги і струму

$$S = UI.$$

Комплексне значення повної потужності отримаємо, якщо помножимо комплексну напругу на сполучене комплексне значення струму

$$\underline{S} = \dot{U} \dot{I}.$$

Сполучене комплексне значення струму $\dot{I}^*$ відрізняється від $\dot{I}$ знаком аргументу:

$$I = I e^{j\psi_i}; \quad I^* = I e^{-j\psi_i}.$$

Комплексне значення повної потужності

$$\underline{S} = \dot{U} \dot{I}^* = U e^{j\psi_u} \cdot I e^{-j\psi_i} = UI e^{j(\psi_u - \psi_i)} = S e^{j\varphi}.$$

У тригонометричній формі

$$S = S \cos \varphi + j S \sin \varphi = P + jQ,$$

де $P = S \cos \varphi$ - активна потужність кола;

$Q = S \sin \varphi$ - реактивна потужність кола;

$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$ - повна потужність кола.

При активно-індуктивному характері навантаження знак перед jQ позитивний, при активно-ємнісному - негативний.

Баланс потужності в колі синусоїдального струму, що містить довільне число джерел енергії і споживачів енергії, тобто резистивних, індуктивних і ємнісних елементів, означає, що:

- алгебраїчна сума активних потужностей усіх джерел енергії дорівнює арифметичній сумі потужностей усіх резистивних елементів

$$\sum P_u = \sum P_r = \sum U_u I_u \cos \varphi = \sum R I_R^2 ;$$

- алгебраїчна сума реактивних потужностей усіх джерел енергії дорівнює різниці між арифметичною сумою реактивних потужностей всіх індуктивних елементів і арифметичною сумою реактивних потужностей усіх ємнісних елементів

$$\sum Q_u = \sum Q_L - \sum Q_c .$$

Доданок алгебраїчної суми активних і реактивних потужностей джерела ЕРС записується зі знаком “+”, якщо позитивний напрямок струму збігається з напрямком дії ЕРС, і зі знаком “-”, якщо напрямки струму і ЕРС не збігаються.

Баланс потужності в комплексній формі: алгебраїчна сума комплексних потужностей усіх джерел енергії дорівнює арифметичній сумі комплексних потужностей усіх споживачів енергії:

$$\sum \underline{S}_u = \sum \dot{U}_u \dot{I}_u^* = \sum \underline{S}_n = \sum \dot{U}_n \dot{I}_n^* .$$

Знаки доданків алгебраїчної суми комплексних потужностей джерел енергії вибираються за тим же правилом, що і для активних і реактивних потужностей.

$$S = \dot{U} \dot{I}^* = P + jQ;$$

$$P = \sum R I^2;$$

$$Q = \sum x_L I_L^2 - \sum x_c I_c^2.$$

Для споживачів – резистивних, індуктивних і ємнісних елементів позитивні напрямки напруг і струмів завжди вибираються однаковими, тому всі складаються з сум у правих частинах рівностей і записуються зі знаком “+”.

ПРИКЛАД РОЗРАХУНКУ

Розрахувати електричне коло синусоїдального струму зі змішаним поєднанням приймачів щодо схеми, зображеної на рис. 19. Визначити струми $\dot{I}_1, \dot{I}_2, \dot{I}_3$ у гілках кола, напруги на ділянках кола $\dot{U}_{ab}, \dot{U}_{bc}$; активну, реактивну та повну потужності і побудувати векторну діаграму на комплексній площині. Скласти баланс потужності.

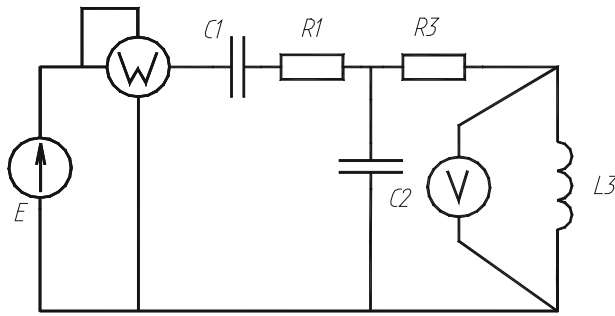


Рисунок 19 - Електричне коло змінного струму

Задане:

$$E = 100 \text{ В}; \quad f = 50 \text{ Гц};$$

$$R_1 = 0; \quad R_3 = 20 \text{ Ом};$$

$$C_1 = \infty; \quad C_2 = 159 \text{ мкФ};$$

$$L_3 = 95 \text{ мГн}.$$

Розв'язання.

Виразимо опори гілок кола у комплексній формі

$$\dot{Z} = R \pm jX = Ze^{\pm j\varphi}; \quad Z = \sqrt{R^2 + X^2}; \quad \operatorname{tg} \varphi = \frac{X}{R};$$

$$\dot{Z}_2 = -j \frac{1}{2\pi f C_2} = -j \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 159 \cdot 10^{-6}} = -j20,03 \text{ Ом} = 20,03e^{-j90^\circ} \text{ Ом};$$

$$\dot{Z}_3 = R_3 + j2\pi f L_3 = 20 + j2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 95 \cdot 10^{-3} = 20 + j29,83 \text{ Ом} = 35,91e^{j56,18^\circ} \text{ Ом};$$

Повний опір кола дорівнює

$$\dot{Z} = \frac{\dot{Z}_2 \dot{Z}_3}{\dot{Z}_2 + \dot{Z}_3} = \frac{20,03e^{-j90^\circ} \cdot 35,91e^{j56,18^\circ}}{-j20,03 + 20 + j29,83} = \frac{719e^{-j33,82^\circ}}{22,27e^{j26,11^\circ}} = 32,3e^{-j59,93^\circ} \text{ Ом}.$$

Виразимо задану напругу $U = E$ у векторній формі. Якщо початкова фаза напруги не задана, то її можна прийняти такою, що дорівнює нулю, і розташувати вектор напруги таким чином, щоб він збігався з позитивним напрямком дійсної осі. У цьому випадку уявна складова комплексного числа відсутня: $\dot{U} = U = 120 \text{ В}$.

Визначимо струм у нерозгалуженій частині кола

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}}{\dot{Z}} = \frac{100}{32,3e^{-j59.93^\circ}} = 3,1e^{j59.93^\circ} \text{ А.}$$

Струми $\dot{I}_2$ і $\dot{I}_3$ у паралельних гілках можуть бути визначені за струмом у нерозгалуженій частині кола

$$\dot{I}_2 = \dot{I}_1 \frac{\dot{Z}_3}{\dot{Z}_2 + \dot{Z}_3} = 3,1e^{j59.93^\circ} \frac{35,91e^{j56.18^\circ}}{22,27e^{j26.11^\circ}} = 4,99e^{j90^\circ} \text{ А;}$$

$$\dot{I}_3 = \dot{I}_1 \frac{\dot{Z}_2}{\dot{Z}_2 + \dot{Z}_3} = 3,1e^{j59.93^\circ} \frac{20,03e^{-j90^\circ}}{22,27e^{j26.11^\circ}} = 2,78e^{-j56.18^\circ} \text{ А.}$$

Визначимо потужності всього кола й окремих гілок

$$\dot{S} = \dot{U} \dot{I}_1^* = 100 \cdot 3,1e^{-j59.93^\circ} = 310e^{-j59.93^\circ} \text{ ВА.}$$

На рис. 20 наведено векторну діаграму струмів і напруг, що побудована за розрахованими даними.

Для визначення активної та реактивної потужностей повну потужність, що визначена комплексним числом у показній формі, переведемо в алгебраїчну форму. Тоді дійсна частина комплексу являє собою активну потужність, а уявна – реактивну

$$\dot{S} = 310 \cos 59,93^\circ - j 310 \sin 59,93^\circ = 155,27 - j 267,9 \text{ ВА.}$$

Таким чином,

- активна потужність дорівнює $P = 155,27 \text{ Вт}$,

- реактивна потужність дорівнює $Q = -267,9 \text{ Вар}$.

Повна, активна та реактивна потужності окремих гілок дорівнюють

$$\dot{S}_2 = \dot{U} \dot{I}_2 = 100 \cdot 4,99e^{-j90^\circ} = 499e^{-j90^\circ} = -j 499 \text{ ВА;}$$

$$P_2 = 0 \text{ Вт;} \quad Q_2 = -499 \text{ Вар.}$$

$$\dot{S}_3 = \dot{U} \dot{I}_3 = 100 \cdot 2,78e^{j56.18^\circ} = 278e^{j56.18^\circ} = 155,68 + j 230,5 \text{ ВА;}$$

$$P_3 = 155,68 \text{ Вт;} \quad Q_3 = 230,5 \text{ Вар.}$$

Перевірка показує, що

$$P \approx P_2 + P_3;$$

$$Q \approx Q_2 + Q_3.$$

Баланс потужностей зійшовся, а отже схема розрахована вірно.

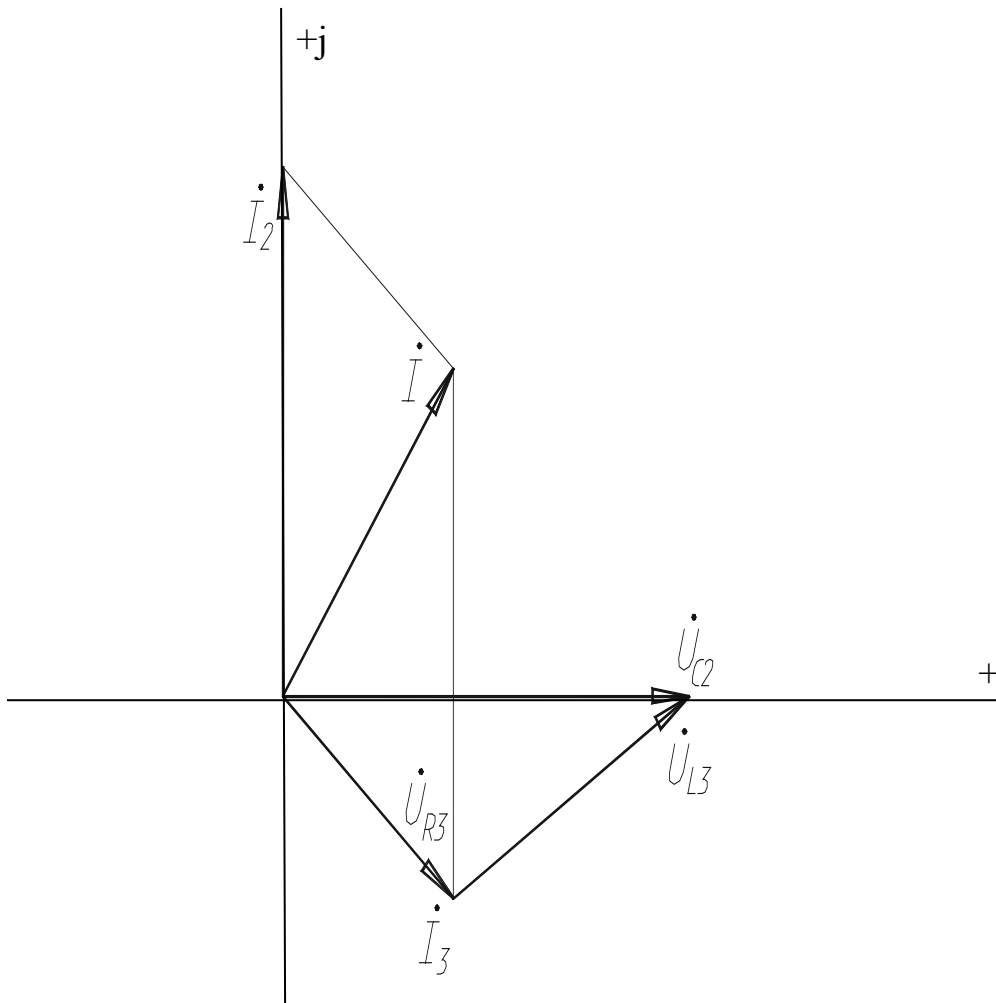


Рисунок 20 - Векторна діаграма струмів і напруг

Запитання для самоперевірки

1. Сформулюйте поняття миттєвого та діючого значень синусоїдального струму.
2. Дайте визначення періоду, частоти, початкової фази та зсуву фаз.
3. Сформулюйте умови появи резонансу напруг, способи його досягнення та побудуйте векторну діаграму.
4. Сформулюйте умови появи резонансу струмів, способи його досягнення та побудуйте векторну діаграму.

5. Викладіть основні положення комплексного методу розрахунку електричних кіл синусоїдального струму.

6. Сформулюйте визначення балансу потужностей у колах синусоїдального змінного струму.

7. Поясніть, від чого залежить коефіцієнт потужності $\cos\varphi$ і з якою метою потрібно його підвищувати.

ЗАВДАННЯ 3 ТРИФАЗНІ КОЛА ЗМІННОГО СТРУМУ

Для електричного кола, схему якого зображено у додатку Г, за наведеними даними визначити фазні та лінійні струми, струм у нейтральному проводі (для чотирьохпроводної схеми), активну потужність кожної фази окремо та усього кола. Побудувати векторні діаграми струмів і напруг.

ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Комплексні значення ЕРС трифазного симетричного генератора можна виразити через однакове для всіх трьох фаз діюче значення E_ϕ і відповідний комплексний множник

$$\begin{aligned}\dot{E}_A &= E_\phi e^{j0^\circ} = E_\phi; \\ \dot{E}_B &= E_\phi e^{-j2\pi/3} = E_\phi e^{-j120^\circ} = E_\phi \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right); \\ \dot{E}_C &= E_\phi e^{j2\pi/3} = E_\phi e^{j120^\circ} = E_\phi \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right).\end{aligned}$$

Комплексна величина $e^{j2\pi/3} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$ називається фазним множником трифазної системи.

Для одержання трифазної системи необхідно певним чином з'єднати фази джерела енергії і фази приймача. Можливі два основних способи з'єднання в трифазній системі – з'єднання джерела енергії і приймача за схемою «зірка» і з'єднання джерела енергії й приймача за схемою «трикутник». Трифазне коло може бути розглянуто як розгалужене коло з трьома джерелами живлення, і для його розрахунку застосовують методи, які використовують при розрахунку електричних кіл з декількома джерелами.

З'єднання джерела енергії й приймача за схемою «зірка» відображено на рис. 21.

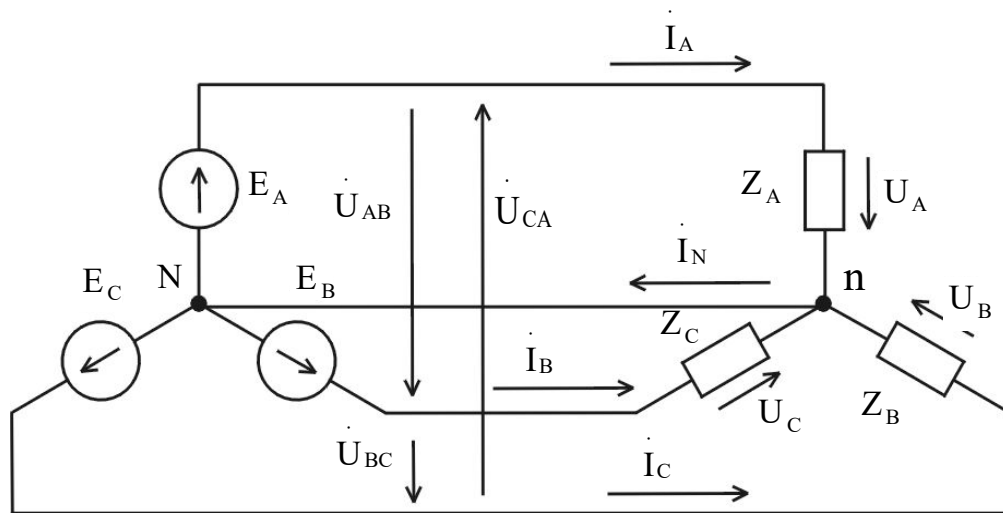


Рисунок 21 - Схема з'єднання джерела енергії й приймача за схемою «зірка»

У трифазній системі напруги $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$ між виводами кожної фазної обмотки генератора або кожної фази приймача називають *фазними напругами*. *Фазні струми* - це струми у фазних обмотках генератора або у фазах приймача.

Не беручи до уваги опори проводів, визначимо струми фаз приймача й генератора

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{E}_A}{\underline{Z}_A}, \dot{I}_B = \frac{\dot{E}_B}{\underline{Z}_B}, \dot{I}_C = \frac{\dot{E}_C}{\underline{Z}_C}.$$

Струм у нейтральному проводі

$$\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C.$$

В трифазному колі можуть бути два режими: симетричний та несиметричний.

Приймач з однаковими опорами всіх трьох фаз називається симетричним

$$\underline{Z}_A = \underline{Z}_B = \underline{Z}_C = \underline{Z}e^{j\varphi}.$$

Розрахунок трифазного кола в симетричному режимі зводять до розрахунку однієї фази та виконують аналогічно розрахунку однофазного кола з одним джерелом. При симетричному приймачі в струмах усіх фаз однакові діючі значення I_ϕ й однакові кути зсуву фаз φ щодо відповідних фазних ЕРС. Струм у нейтральному проводі в цьому випадку дорівнює нулю. Тому при симетричному приймачі (чи симетричному навантаженні

генератора) нейтральний провід не потрібний і не прокладається. Прикладом такого симетричного приймача є трифазний двигун із з'єднанням трифазних обмоток за схемою «зірка».

У симетричній трифазній системі діючі значення фазних напруг однакові

$$U_A = U_B = U_C = U_\phi.$$

Запишемо вираз для визначення лінійних напруг за другим законом Кірхгофа

$$\dot{U}_{AB} = \dot{E}_A - \dot{E}_B = \dot{U}_A - \dot{U}_B = U_\phi e^{j30^\circ};$$

$$\dot{U}_{BC} = \dot{E}_B - \dot{E}_C = \dot{U}_B - \dot{U}_C = U_\phi e^{-j90^\circ};$$

$$\dot{U}_{CA} = \dot{E}_C - \dot{E}_A = \dot{U}_C - \dot{U}_A = U_\phi e^{j150^\circ},$$

де U_ϕ - діюче значення лінійної напруги.

При з'єднанні джерела енергії й приймача за схемою «зірка» лінійні струми дорівнюють відповідним фазним струмам

$$I_\phi = I_\phi.$$

На рис. 22 наведена векторна діаграма напруг та струмів.

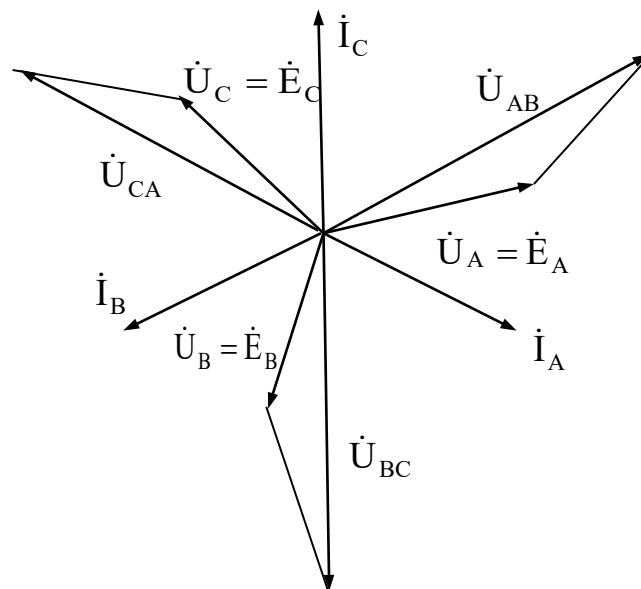


Рисунок 22 - Векторна діаграма напруг та струмів при з'єднанні за схемою «зірка»

З векторної діаграми видно, що між діючими значеннями в цьому випадку справедливе співвідношення $U_{\text{л}} = 2U_{\text{ф}} \cos 30^\circ = \sqrt{3}U_{\text{ф}}$. Наприклад, лінійна напруга $U_{\text{л}} = 380 \text{ В}$, тоді $U_{\text{ф}} = 220 \text{ В}$ чи $U_{\text{л}} = 220 \text{ В}$, тоді $U_{\text{ф}} = 127 \text{ В}$.

З'єднання джерела енергії й приймача за схемою трикутник зображене на рис. 23. У трифазній системі, виконаній за схемою трикутник, нейтральний провід відсутній.

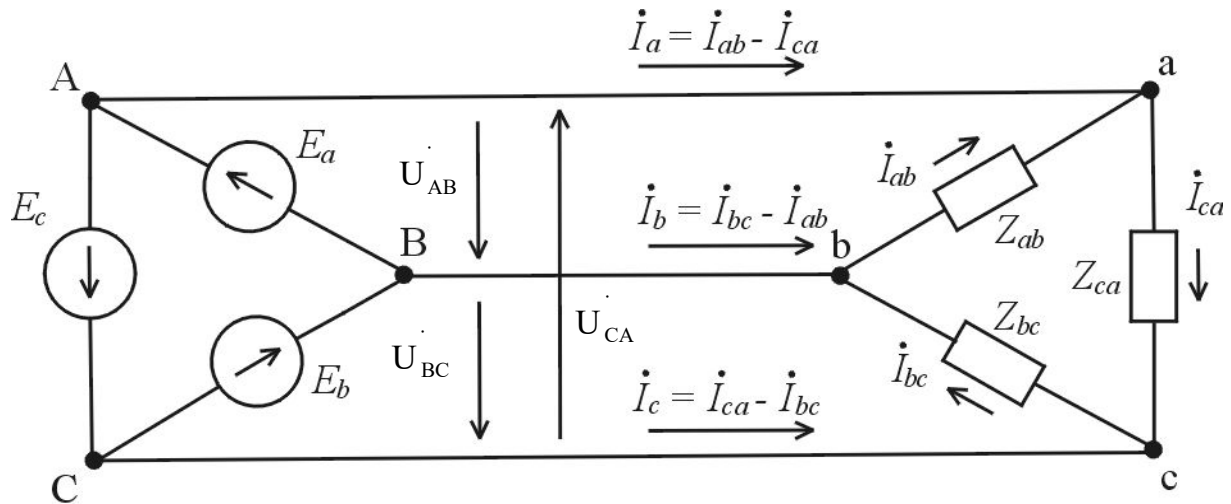


Рисунок 23 - Схема з'єднання джерела енергії й приймача за схемою «трикутник»

Лінійні напруги дорівнюють відповідним фазним напругам

$$\dot{U}_{AB} = \dot{E}_A; \quad \dot{U}_{BC} = \dot{E}_B; \quad \dot{U}_{CA} = \dot{E}_C.$$

За законом Ома комплексні значення фазних струмів

$$\dot{I}_{AB} = \frac{\dot{E}_A}{\underline{Z}_{AB}} = \frac{\dot{U}_{AB}}{\underline{Z}_{AB}}, \quad \dot{I}_{BC} = \frac{\dot{E}_B}{\underline{Z}_{BC}} = \frac{\dot{U}_{BC}}{\underline{Z}_{BC}}, \quad \dot{I}_{CA} = \frac{\dot{E}_C}{\underline{Z}_{CA}} = \frac{\dot{U}_{CA}}{\underline{Z}_{CA}}.$$

При симетричному приймачі

$$\underline{Z}_{AB} = \underline{Z}_{BC} = \underline{Z}_{CA} = \underline{Z} e^{j\varphi}$$

й у всіх фазних струмів однакові діючі значення $I_{\text{ф}}$ та однакові кути зсуву фаз відносно відповідних ЕРС і фазних напруг.

З трикутників струмів (рис. 24) випливає, що в симетричній трифазній системі

$$I_{\text{л}} = 2I_{\text{ф}} \cos 30^\circ = \sqrt{3}I_{\text{ф}}.$$

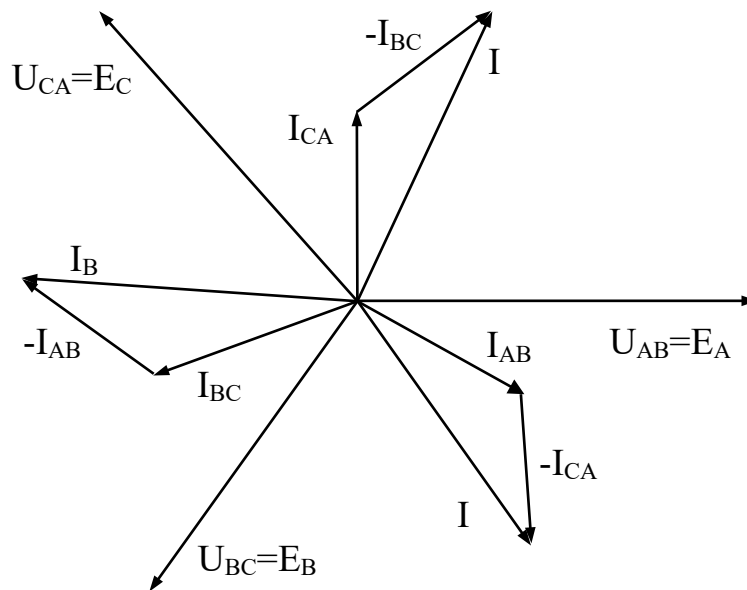


Рисунок 24 - Векторна діаграма при з'єднанні джерела енергії й приймача за схемою «трикутник»

Значення лінійних та фазних напруг дорівнюють один одному як при симетричному, так і при несиметричному приймачі

$$U_{\text{л}} = U_{\text{ф}}.$$

Перевагою з'єднання джерела енергії і приймача за схемою «трикутник» у порівнянні з трипровідною системою, з'єднаною за схемою «зірка», є взаємна незалежність фазних струмів.

ПРИКЛАДИ РОЗРАХУНКУ

Приклад 1. У трифазну мережу ввімкнено приймач, з'єднаний «трикутником» (рис. 25). Знайти струми у кожній гілці навантаження і лінії та визначити активну потужність за методом двох ватметрів. Побудувати векторну діаграму.

Задане:

$$U_{\text{л}} = 127 \text{ В};$$

$$R_{\text{ab}} = 10 \text{ Ом};$$

$$X_{\text{bc}} = 10 \text{ Ом};$$

$$X_{\text{ca}} = 10 \text{ Ом}.$$

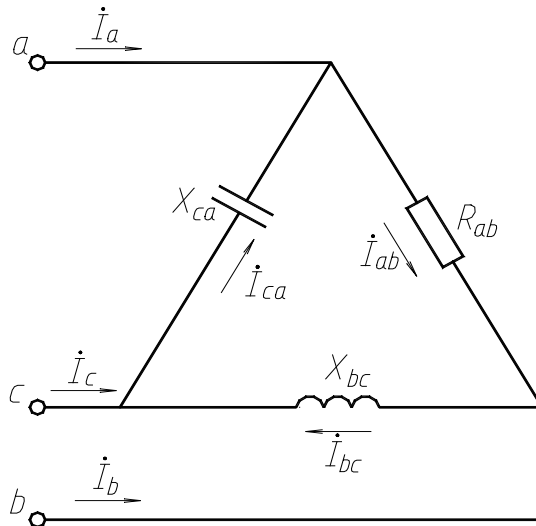


Рисунок 25 - Трифазне коло, з'єднане «трикутником»

Розв'язання.

Розрахунок струмів у трифазних колах виконується комплексним методом. Візьмемо вектор лінійної напруги $\dot{U}_{AB}$ спрямованим по дійсній осі, тоді

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_{ab} = 127 \text{ В};$$

$$\dot{U}_{BC} = \dot{U}_{bc} = 127e^{-j120^\circ} \text{ В};$$

$$\dot{U}_{CA} = \dot{U}_{ca} = 127e^{j120^\circ} \text{ В}.$$

Переведемо опори фаз у комплексний вид

$$\bar{Z}_{ab} = R_{ab} = 10 \text{ Ом};$$

$$\bar{Z}_{bc} = jX_{ba} = j10 = 10e^{j90^\circ} \text{ Ом};$$

$$\bar{Z}_{ca} = -jX_{ca} = -j10 = 10e^{-j90^\circ} \text{ Ом}.$$

Визначаємо фазні струми

$$\dot{I}_{ab} = \dot{U}_{ab} / \bar{Z}_{ab} = 127/10 = 12,7 \text{ А};$$

$$\dot{I}_{bc} = \dot{U}_{bc} / \bar{Z}_{bc} = 127e^{-j120^\circ} / 10e^{j90^\circ} = 12,7e^{-j210^\circ} \text{ А} = -11 + j6,35 \text{ А};$$

$$\dot{I}_{ca} = \dot{U}_{ca} / \bar{Z}_{ca} = 127e^{j120^\circ} / 10e^{-j90^\circ} = 12,7e^{j120^\circ} \text{ А} = -11 - j6,35 \text{ А}.$$

Знаходимо лінійні струми

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca} = 12,7 + 11 + j6,35 = 23,7 + j6,35 = 24,5e^{j15^\circ} \text{ А};$$

$$\dot{I}_B = \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab} = -11 + j6,35 - 12,7 = -23,7 + j6,35 = 24,5e^{j165^\circ} \text{ A};$$

$$\dot{I}_C = \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc} = -11 - j6,35 + 11 - j6,35 = -j12,7 = 12,7e^{-j90^\circ} \text{ A}.$$

Активна потужність дорівнює алгебраїчній сумі активних потужностей кожної фази

$$P_{ab} = R_{ab} I_{ab}^2 = 1612,9 \text{ Вт};$$

$$P_{bc} = R_{bc} I_{bc}^2 = 0 \text{ Вт};$$

$$P_{ca} = R_{ca} I_{ca}^2 = 0 \text{ Вт};$$

$$P = P_{ab} + P_{bc} + P_{ca} = 1612,9 \text{ Вт}.$$

Векторна діаграма має вигляд, показаний на рис. 26.

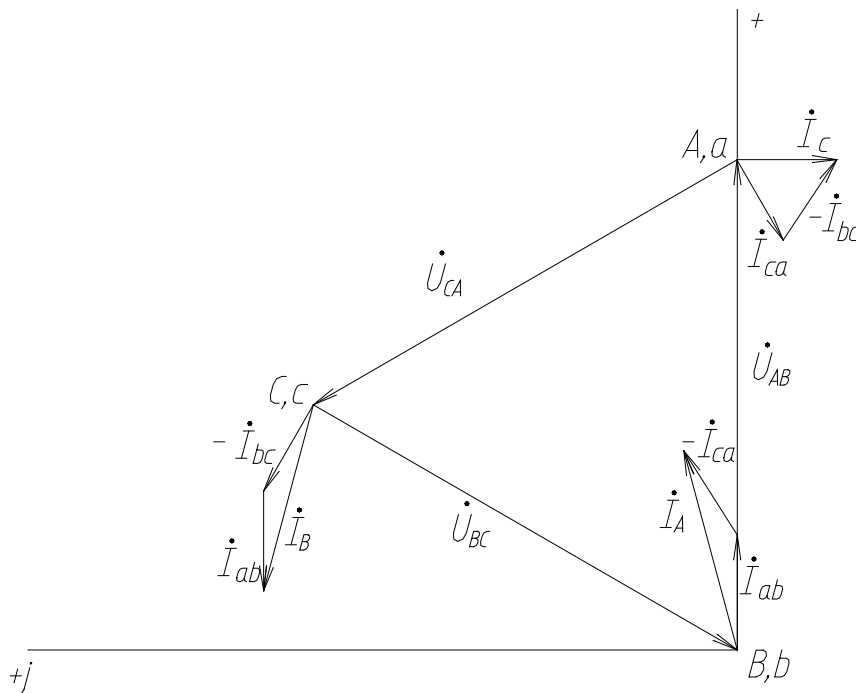


Рисунок 26 - Векторна діаграма струмів і напруг

Приклад 2. У трифазну мережу ввімкнено навантаження за схемою «зірка» (рис. 27). Визначити лінійні та фазні струми та струм у нейтральному дроті. Побудувати векторну діаграму. Знайти активну потужність кола.

Задане:

$$U_{\text{л}} = 380 \text{ В};$$

$$R_a = 16,8 \text{ Ом};$$

$$X_a = 8 \text{ Ом};$$

$$R_b = 8 \text{ Ом};$$

$$X_b = 6 \text{ Ом};$$

$$R_c = 8 \text{ Ом};$$

$$X_c = 4 \text{ Ом}.$$

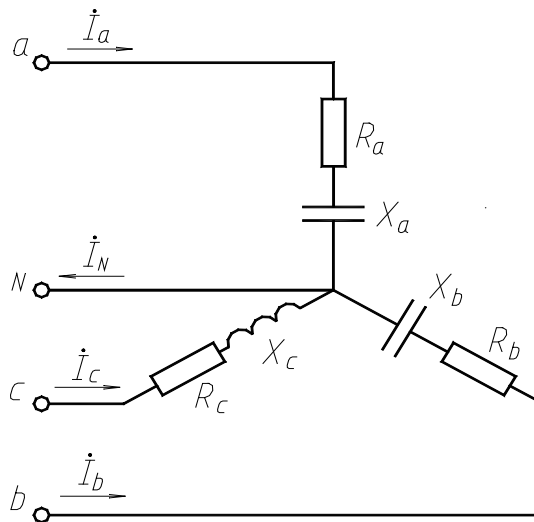


Рисунок 27 - Трифазне коло, що з'єднане «зіркою»

Розв'язання.

Будемо вважати, що вектор фазної напруги дорівнює

$$\dot{U}_a = U_{\text{л}} / \sqrt{3} = 380 / \sqrt{3} = 220 \text{ В};$$

$$\dot{U}_b = 220e^{-j120^\circ} \text{ В};$$

$$\dot{U}_c = 220e^{j120^\circ} \text{ В}.$$

Переведемо опори фаз у комплексний вид

$$\bar{Z}_a = 16,8 - j8 = Z_a e^{-j\varphi_a} = 18,6e^{-j25,5^\circ} \text{ Ом};$$

$$\text{де } Z_a = \sqrt{R_a^2 + (-X_a)^2} = \sqrt{16,8^2 + 8^2} = 18,6 \text{ Ом}; \quad \varphi_a = \arctg\left(\frac{-X_a}{R_a}\right) = 25,5^\circ;$$

$$\bar{Z}_b = 8 - j6 = Z_b e^{-j36,87^\circ} \text{ Ом};$$

$$\text{де } Z_b = \sqrt{R_b^2 + (-X_b)^2} = \sqrt{64 + 36} = 10 \text{ Ом}; \quad \varphi_b = \arctg\left(\frac{-X_b}{R_b}\right) = 36,87^\circ;$$

$$\bar{Z}_c = 8 + j4 = 8,9e^{j26,6^\circ} \text{ Ом};$$

$$\text{де } Z_c = \sqrt{R_c^2 + X_c^2} = \sqrt{64 + 16} = 8,9 \text{ Ом}; \quad \varphi_c = \arctg\left(\frac{X_c}{R_c}\right) = 26,6^\circ.$$

Фазні струми при з'єднанні «зіркою» дорівнюють лінійним струмам.
Знайдемо їх значення

$$\begin{aligned}\dot{I}_a &= \dot{U}_a / \bar{Z}_a = 220 / 18,6 e^{-j25,5^\circ} = 11,8 e^{j25,5^\circ} = 10,6 + j5 \text{ A}; \\ \dot{I}_b &= \dot{U}_b / \bar{Z}_b = 220 e^{-j120^\circ} / 10 e^{-j36,87^\circ} = 22 e^{-j83,13^\circ} = 2,63 - j21,8 \text{ A}; \\ \dot{I}_c &= \dot{U}_c / \bar{Z}_c = 220 e^{j120^\circ} / 8,9 e^{j26,6^\circ} = 24,5 e^{j93,4^\circ} = -1,45 + j24,5 \text{ A};\end{aligned}$$

Струм у нейтральному проводі дорівнює

$$\dot{I}_N = \dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c = 10,6 + j5 + 2,63 - j21,8 - 1,45 + j24,5 = 11,78 + j7,7 = 14,1 e^{j33^\circ} \text{ A}.$$

Активна потужність дорівнює алгебраїчній сумі активних потужностей кожної фази

$$P_a = R_a I_a^2 = 2339,2 \text{ Вт};$$

$$P_b = R_b I_b^2 = 3872 \text{ Вт};$$

$$P_c = R_c I_c^2 = 4802 \text{ Вт};$$

$$P = P_a + P_b + P_c = 2339,2 + 3872 + 4802 = 11013,2 \text{ Вт}.$$

Векторна діаграма має вигляд, показаний на рис. 28.

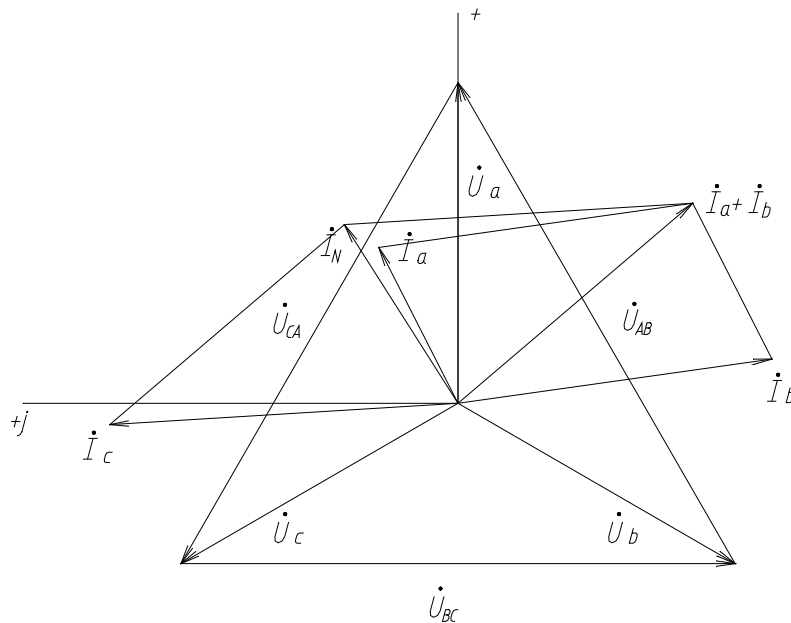


Рисунок 28 - Векторна діаграма струмів і напруг

Таким чином, побудова векторної діаграми підтвердила вірність аналітичних розрахунків.

Запитання для самоперевірки

1. Поясніть особливості роботи трифазного кола у симетричному та несиметричному режимах.
2. Наведіть основні співвідношення для трифазних кіл, з'єднаних за схемою «зірка», і нарисуйте векторні діаграми.
3. Поясніть значення нульового проводу при з'єднанні трифазного кола за схемою «зірка».
4. Наведіть основні співвідношення для трифазних кіл, з'єднаних за схемою «трикутник», і нарисуйте векторні діаграми.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

Базова

1. Малинівський С.М. Загальна електротехніка / С.М. Малинівський. – Львів: Бескид Біт, 2003. – 263 с.
2. Монтік П.М. Електротехніка та електромеханіка / П.М. Монтік. – Львів: Новий світ-2000, 2012. – 302 с.
3. Рожкова С.Е. Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка: конспект лекцій / П.П. Рожков, С.Е. Рожкова. – Харків: ХНАДУ, 2016. – 179 с.

Допоміжна

1. Красников В.М., Новиков А.В. Електромеханіка / В.М. Красников, А.В. Новиков. – Київ: Вища шк., 1994. – 372 с.
2. Рожкова С.Е., Рожков П.П. Лабораторний практикум з електротехніки, електромеханіки та електричних вимірювань. - Харків: ХНАДУ, 2017. – 87 с.

Інформаційні ресурси

1. <http://electricalschool.info/spravochnik/electroteh/>
2. <http://dl.khadi.kharkov.ua/course/view.php?id=262>

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний автомобільно-дорожній
університет

РОЗРАХУНКОВО-ГРАФІЧНА РОБОТА

“Розрахунок складних електричних кіл постійного та змінного струму”
з дисципліни “ Електротехніка та електромеханіка ”

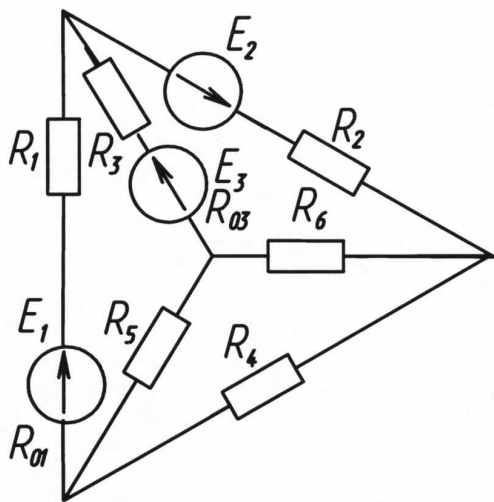
Варіант №

Виконав: ст. гр.

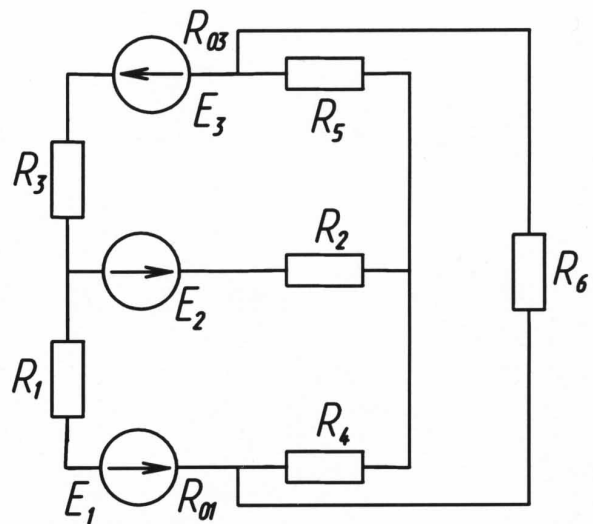
Прийняв:

Харків 20__

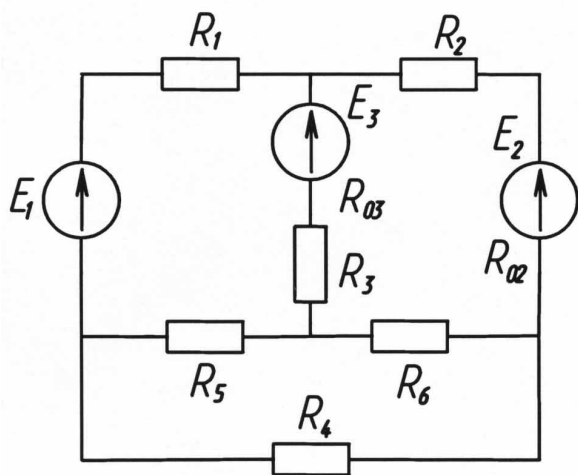
Вхідні дані													
№ вар-та	№ рис.	E ₁ , В	E ₂ , В	E ₃ , В	R ₀₁ , Ом	R ₀₂ , Ом	R ₀₃ , Ом	R ₁ , Ом	R ₂ , Ом	R ₃ , Ом	R ₄ , Ом	R ₅ , Ом	R ₆ , Ом
0	0	22	24	10	0,2	-	1,2	2	1	8	4	10	6
1	1	55	18	4	0,8	-	0,8	8	4	3	2	4	4
2	2	36	10	25	-	0,4	0,5	4	8	3	1	2	7
3	3	16	5	32	-	0,6	0,8	9	3	2	4	1	5
4	4	14	25	28	0,9	1,2	-	5	2	8	2	2	6
5	5	5	16	30	0,4	-	0,7	6	4	3	2	5	3
6	6	10	6	24	0,8	0,3	-	3,5	5	6	6	3	1
7	7	6	20	4	-	0,8	1,2	4	6	4	4	3	3
8	8	21	4	10	-	0,2	0,6	5	7	2	8	1	1
9	9	4	9	18	0,8	-	0,7	2,7	10	4	8	10	2
10	10	4	24	6	0,9	-	0,5	9	8	1	6	10	4
11	11	16	8	9	0,2	0,6	-	2,5	6	6	5	10	5
12	12	48	12	6	0,8	1,4	-	4,2	4	2	12	6	2
13	13	12	36	12	-	0,4	1,2	3,5	5	1	5	6	9
14	14	12	6	40	1,2	0,6	-	2	3	8	5	7	8
15	15	8	6	36	1,3	-	1,2	3	2	1	6	8	6
16	16	72	12	4	0,7	1,5	-	6	1	10	4	12	4
17	17	12	48	6	-	0,4	0,4	2,5	1	4	15	2	2
18	18	12	30	9	0,5	-	0,5	3,5	2	3	3	1	3
19	19	9	6	27	-	1	0,8	4,5	2	8	13	4	3
20	20	22	24	10	0,2	-	1,2	2	1	8	4	10	6
21	21	55	18	4	0,8	-	0,8	8	4	3	2	4	4
22	22	36	10	25	-	0,4	0,5	4	8	3	1	2	7
23	23	16	5	32	-	0,6	0,8	9	3	2	4	1	5
24	24	14	25	28	0,9	1,2	-	5	2	8	2	2	6
25	25	5	16	30	0,4	-	0,7	6	4	3	2	5	3
26	26	10	6	24	0,8	0,3	-	3,5	5	6	6	3	1
27	27	6	20	4	-	0,8	1,2	4	6	4	4	3	3
28	28	21	4	10	-	0,2	0,6	5	7	2	8	1	1
29	29	4	9	18	0,8	-	0,7	2,7	10	4	8	10	2
30	30	4	24	6	0,9	-	0,5	9	8	1	6	10	4
31	31	16	8	9	0,2	0,6	-	2,5	6	6	5	10	5
32	32	48	12	6	0,8	1,4	-	4,2	4	2	12	6	2
33	33	12	36	12	-	0,4	1,2	3,5	5	1	5	6	9
34	34	12	6	40	1,2	0,6	-	2	3	8	5	7	8
35	35	8	6	36	1,3	-	1,2	3	2	1	6	8	6
36	36	72	12	4	0,7	1,5	-	6	1	10	4	12	4
37	37	12	48	6	-	0,4	0,4	2,5	1	4	15	2	2
38	38	12	30	9	0,5	-	0,5	3,5	2	3	3	1	3
39	39	9	6	27	-	1	0,8	4,5	2	8	13	4	3
40	40	22	24	10	0,2	-	1,2	2	1	8	4	10	6
41	41	55	18	4	0,8	-	0,8	8	4	3	2	4	4
42	42	36	10	25	-	0,4	0,5	4	8	3	1	2	7
43	43	16	5	32	-	0,6	0,8	9	3	2	4	1	5
44	44	14	25	28	0,9	1,2	-	5	2	8	2	2	6
45	45	5	16	30	0,4	-	0,7	6	4	3	2	5	3
46	46	10	6	24	0,8	0,3	-	3,5	5	6	6	3	1
47	47	6	20	4	-	0,8	1,2	4	6	4	4	3	3
48	48	21	4	10	-	0,2	0,6	5	7	2	8	1	1
49	49	4	9	18	0,8	-	0,7	2,7	10	4	8	10	2
50	50	15	63	6	1	-	1,2	5	3	1	2	12	3



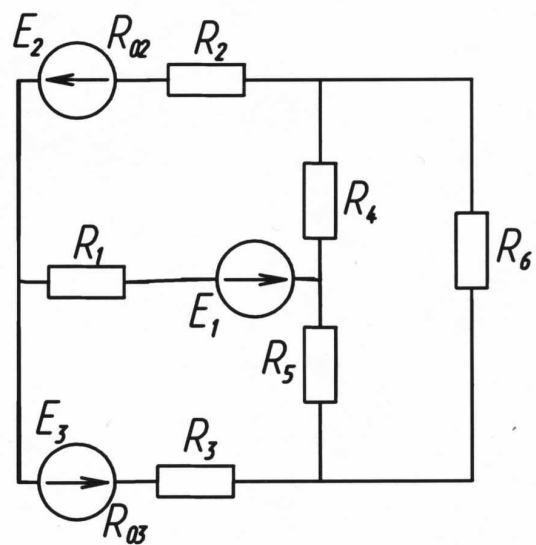
0



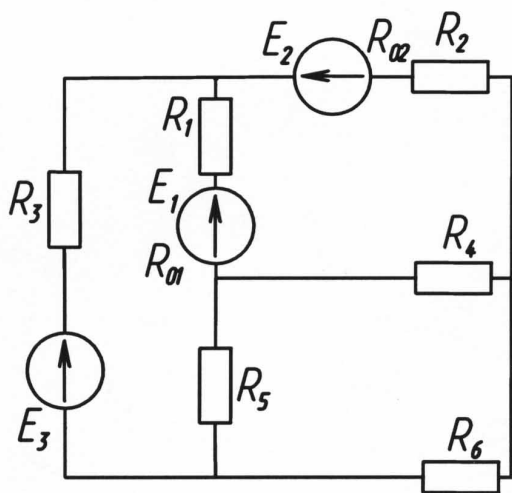
1



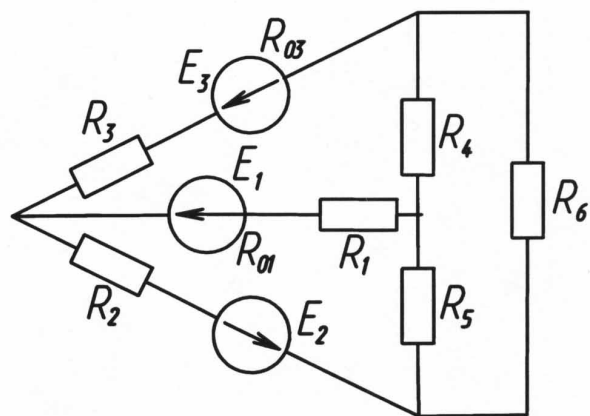
2



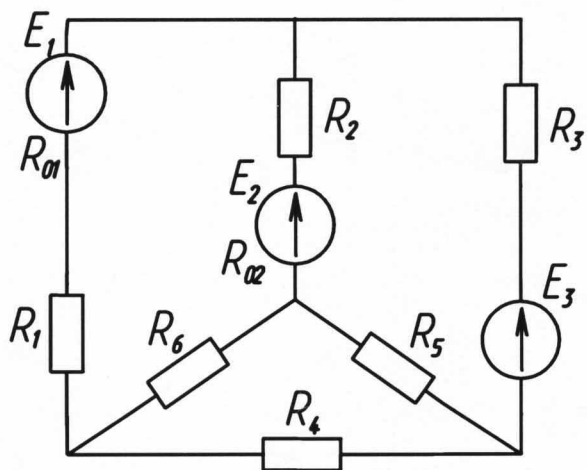
3



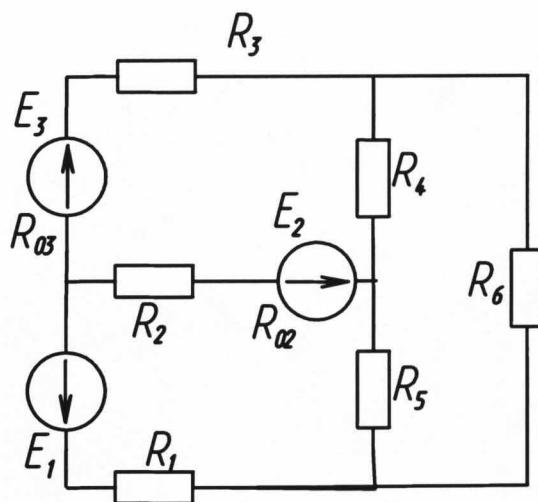
4



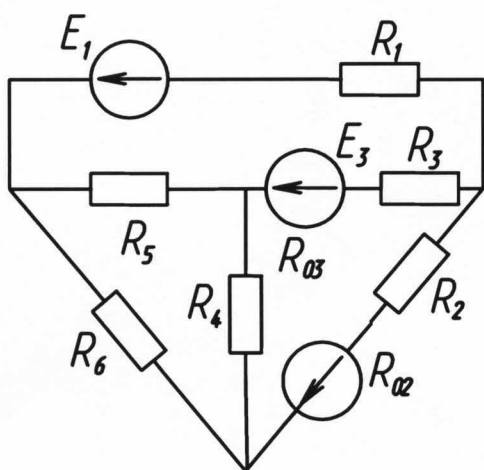
5



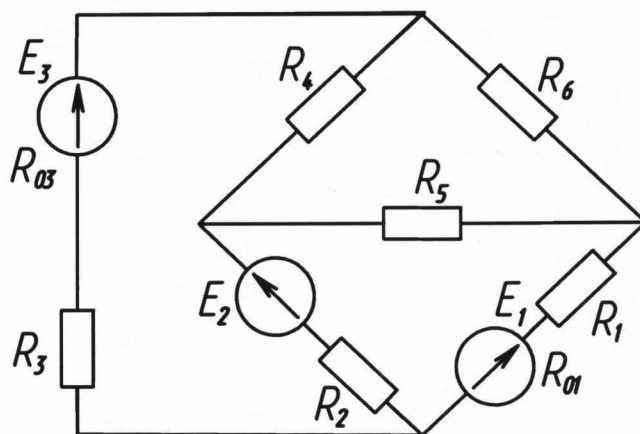
6



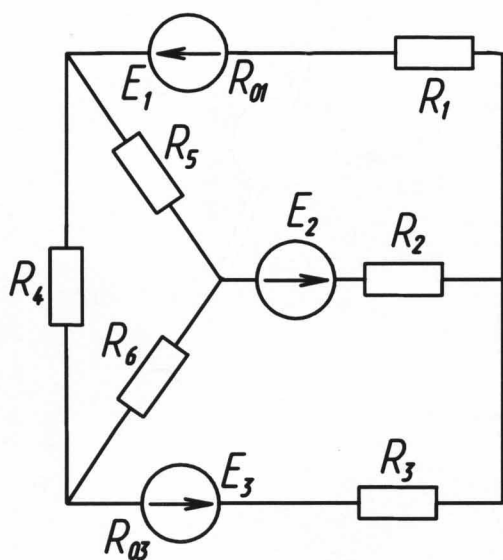
7



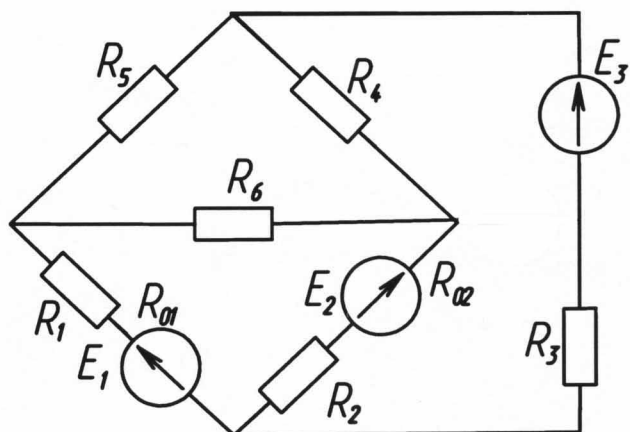
8



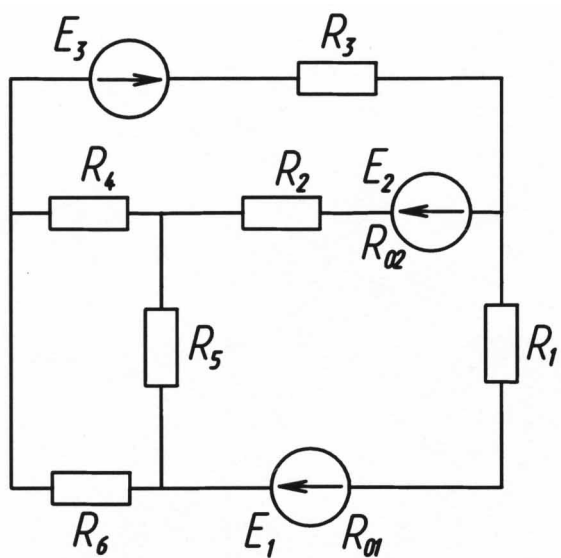
9



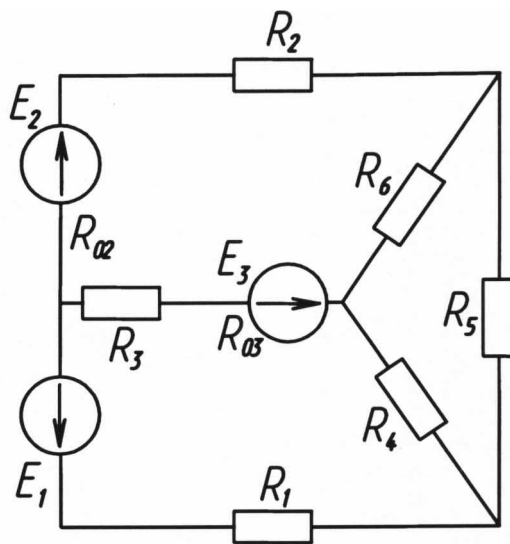
10



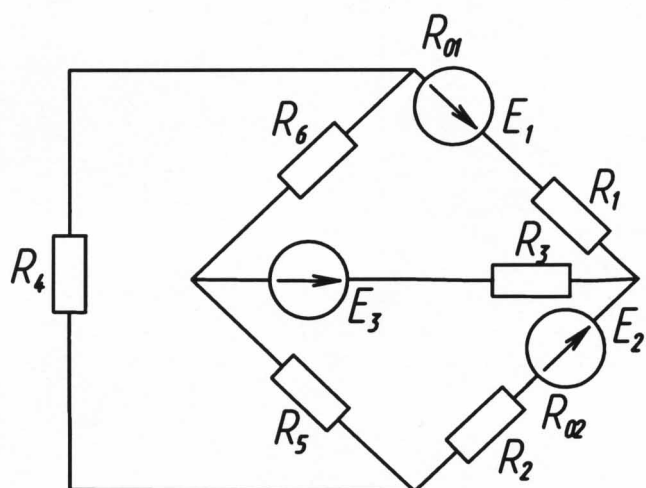
11



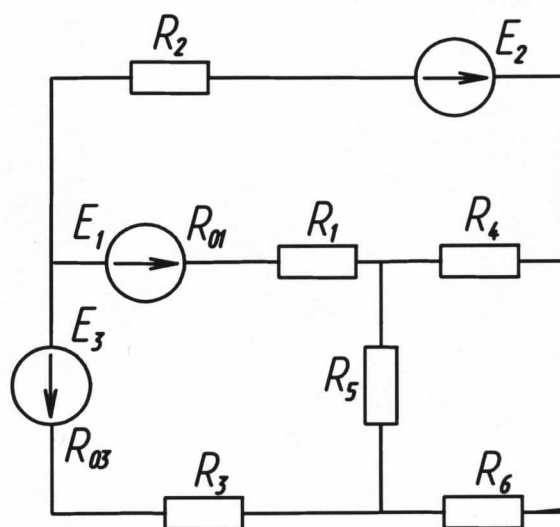
12



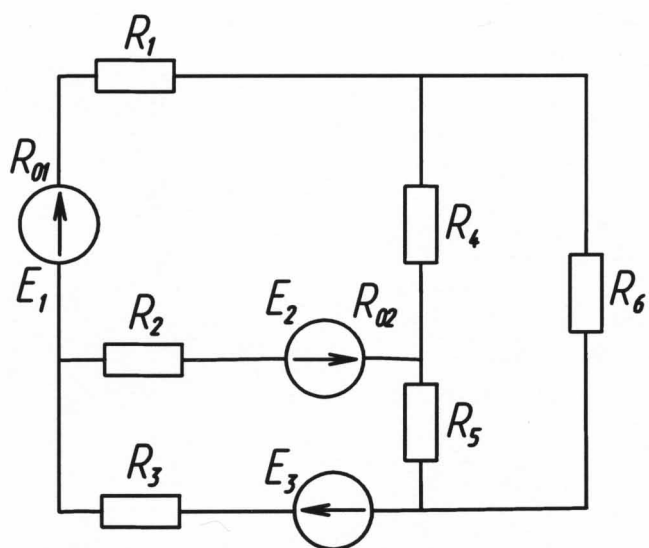
13



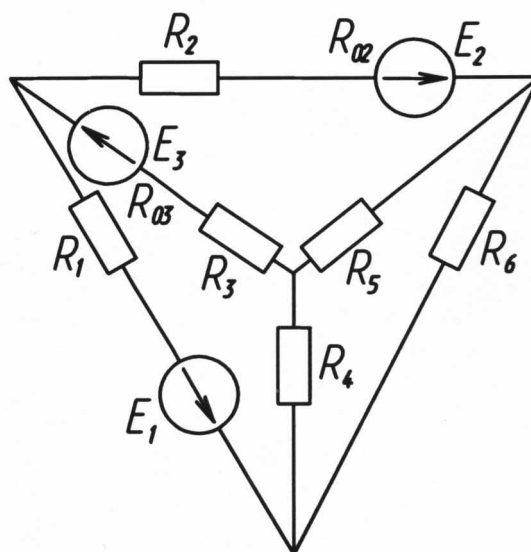
14



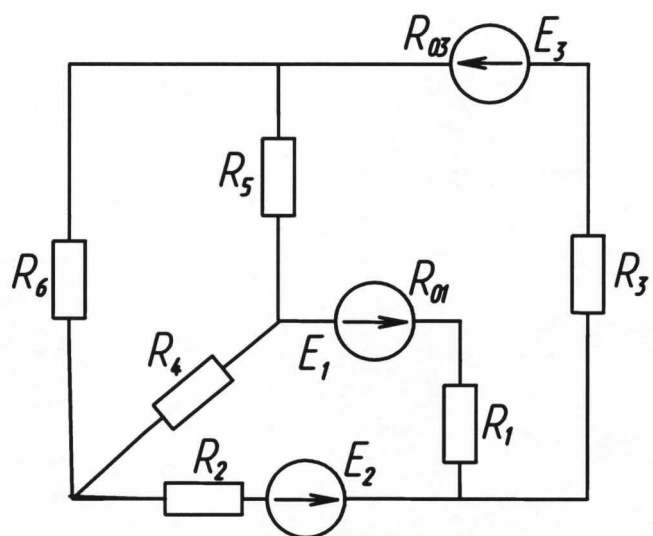
15



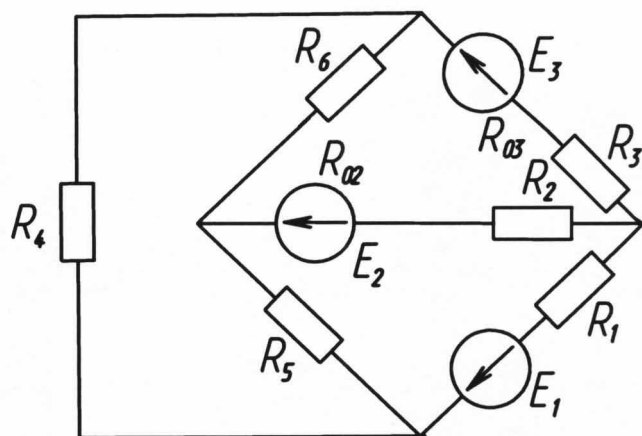
16



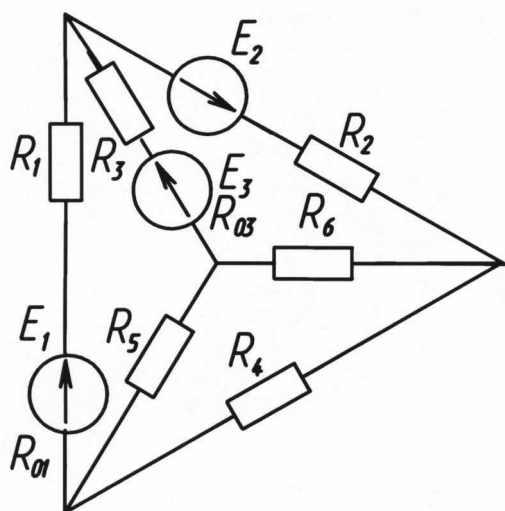
17



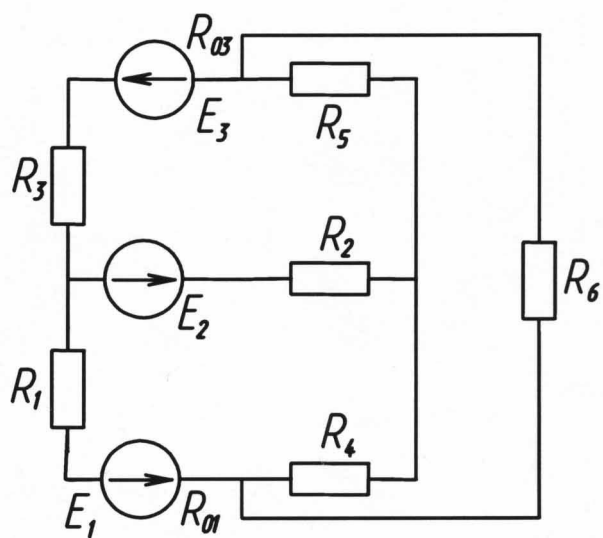
18



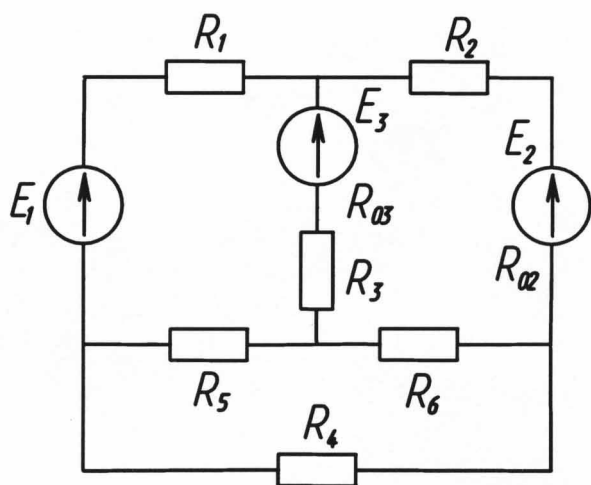
19



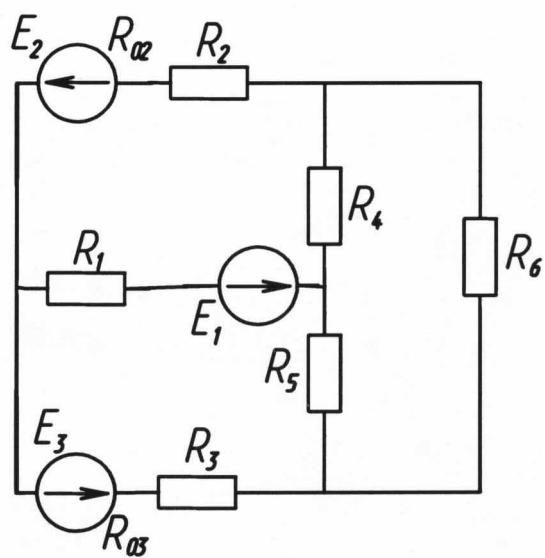
20



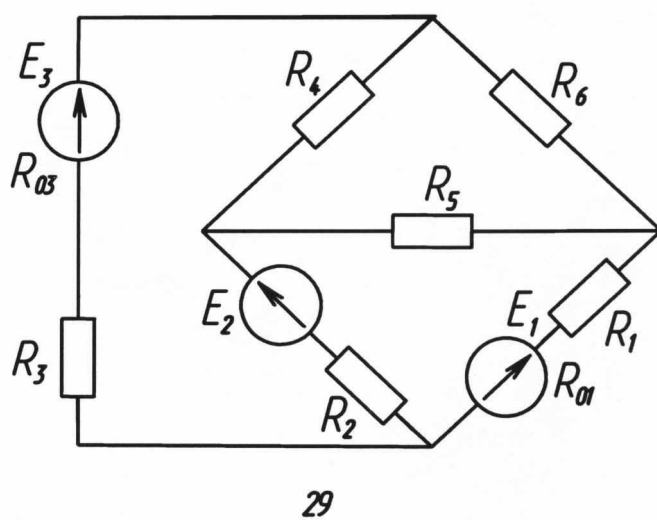
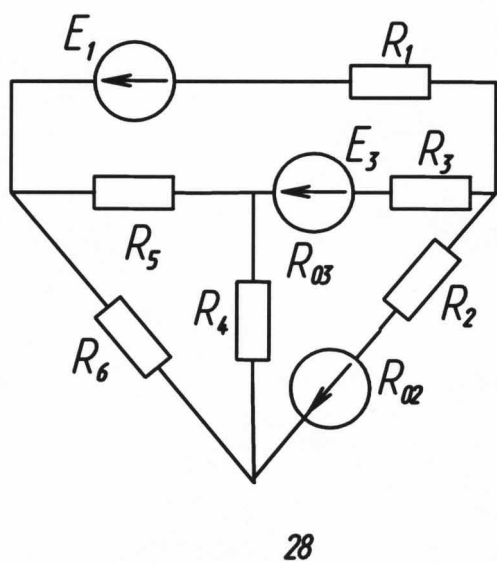
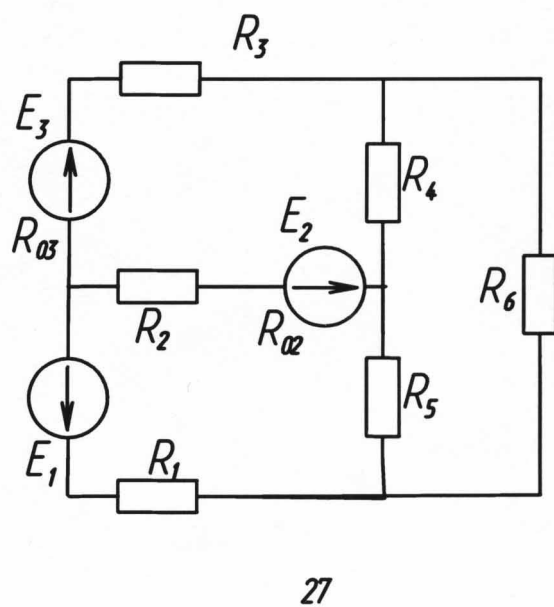
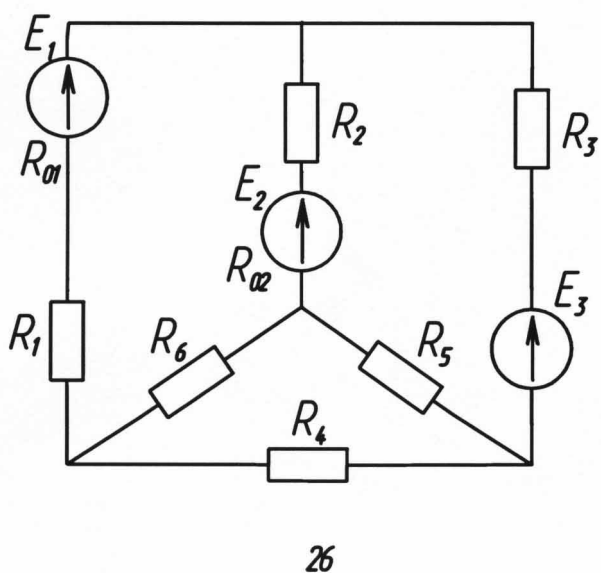
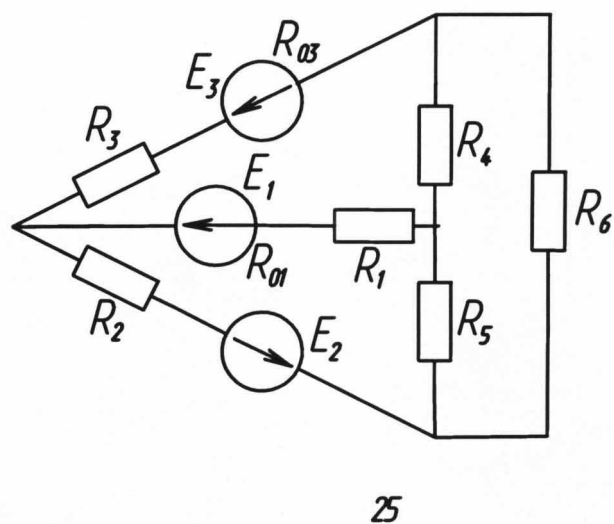
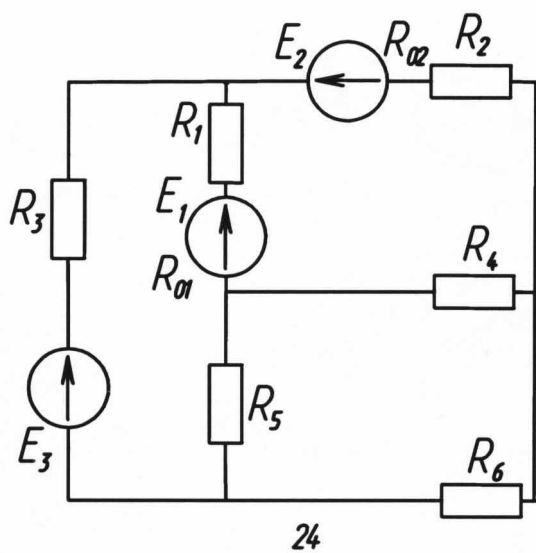
21

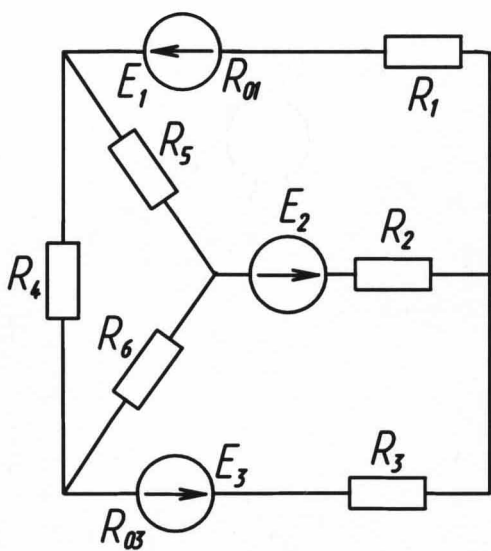


22

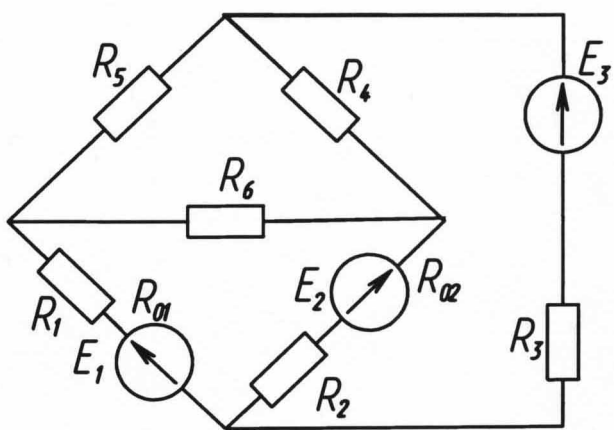


23

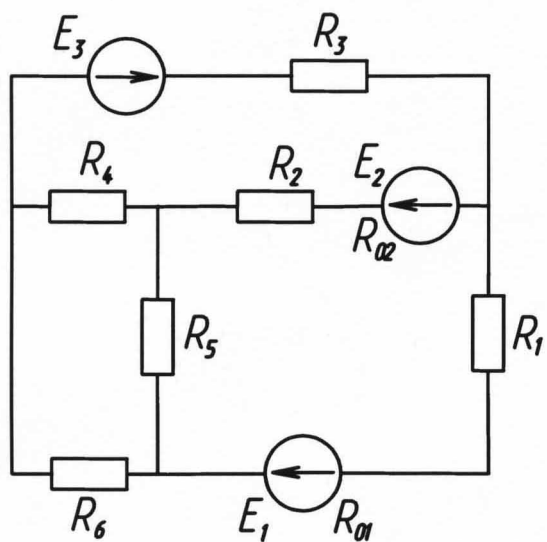




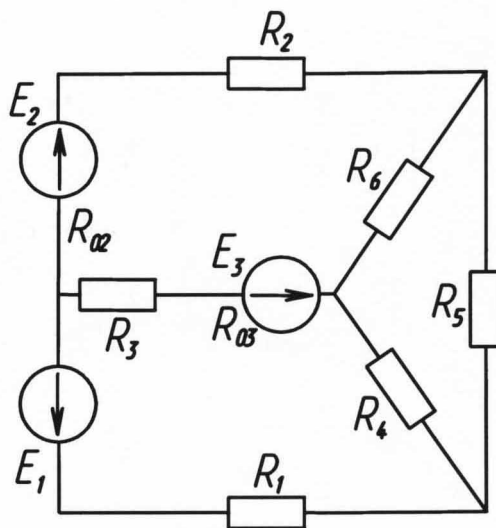
30



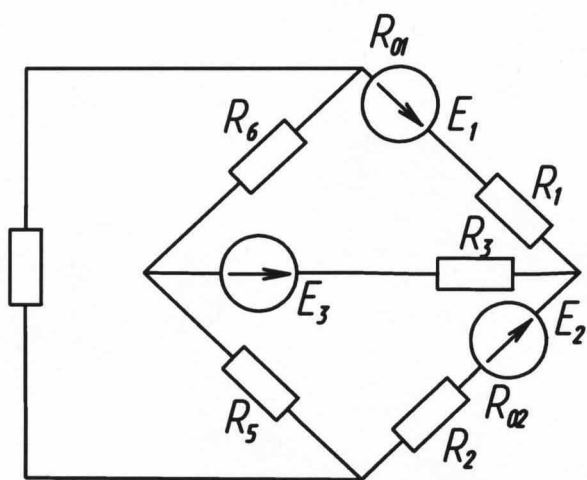
31



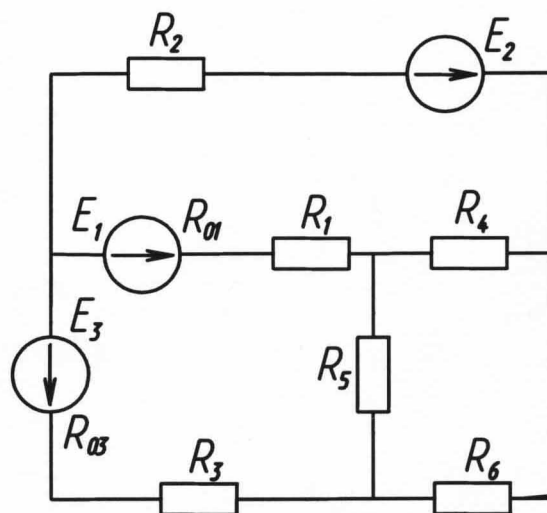
32



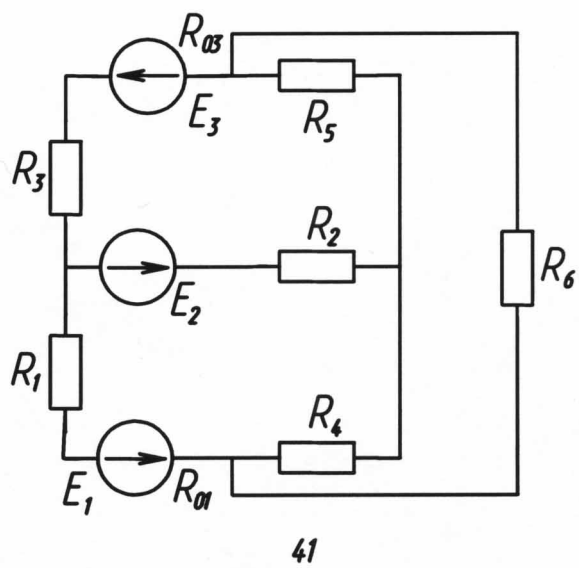
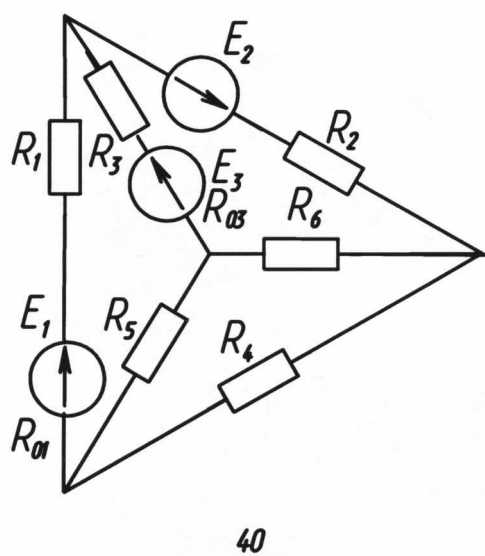
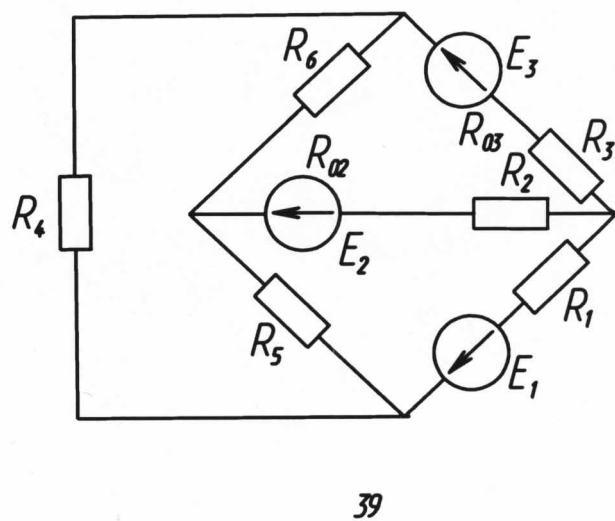
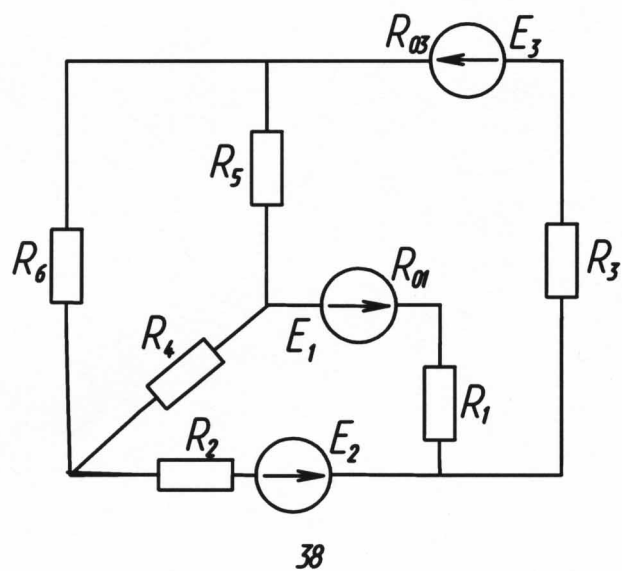
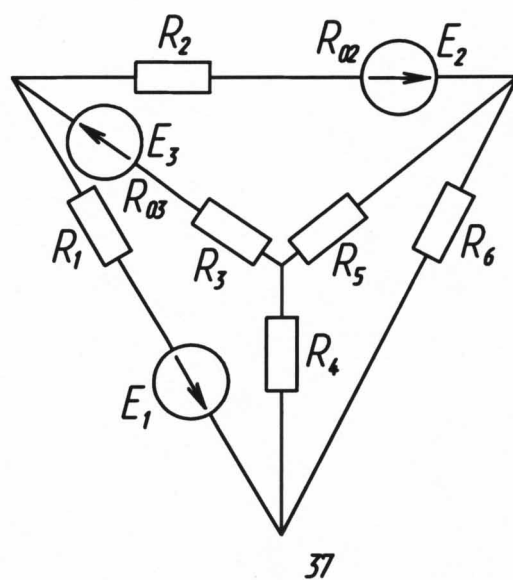
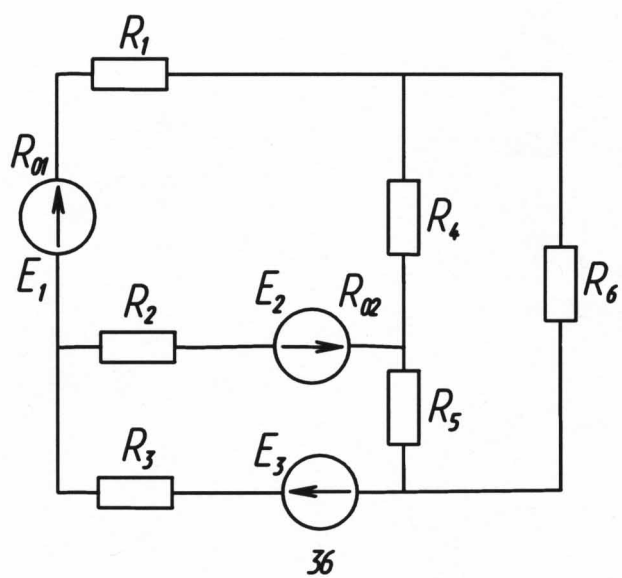
33

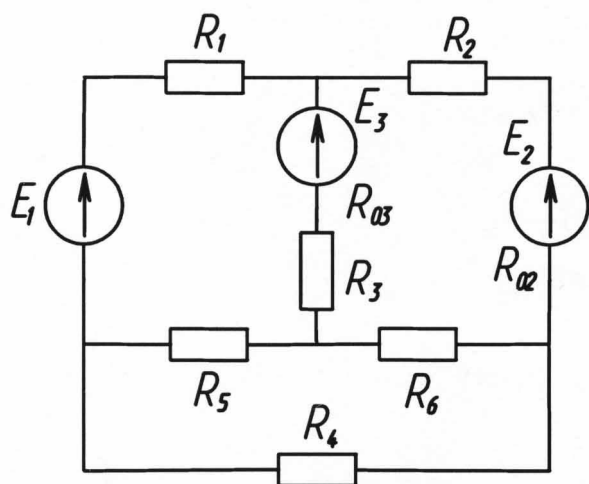


34

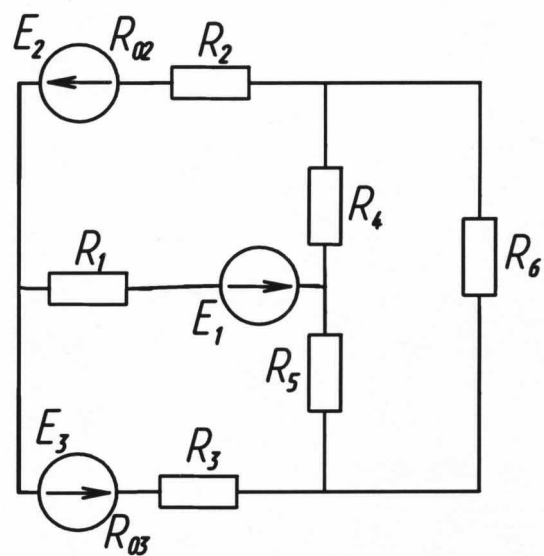


35

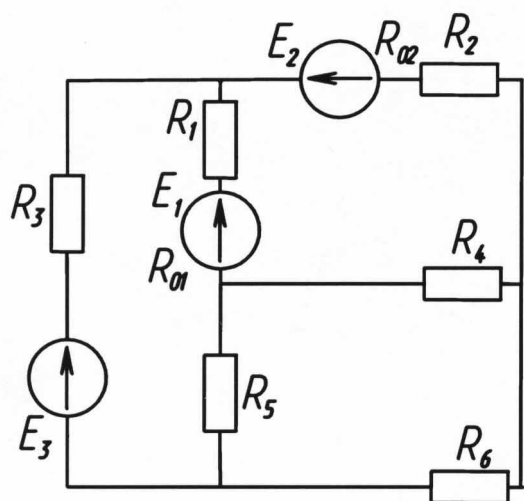




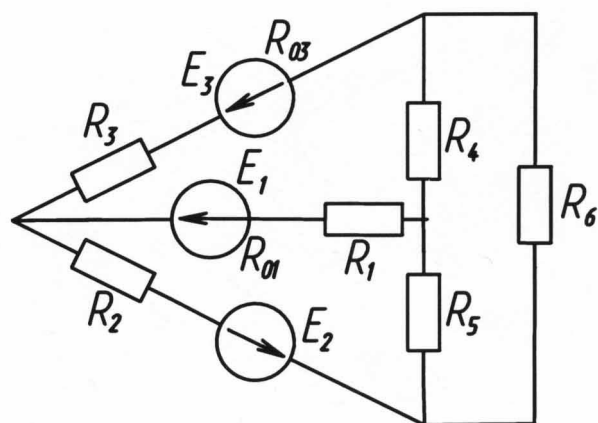
42



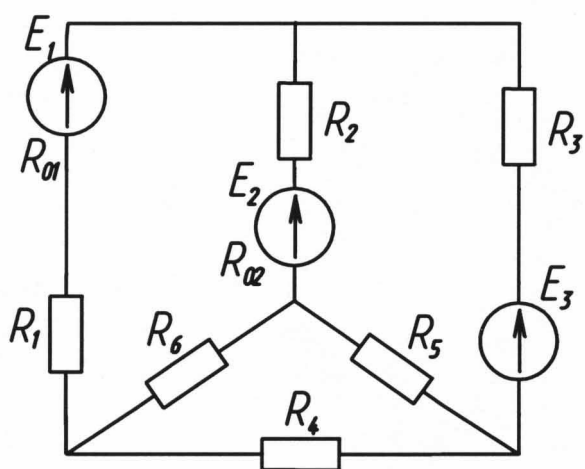
43



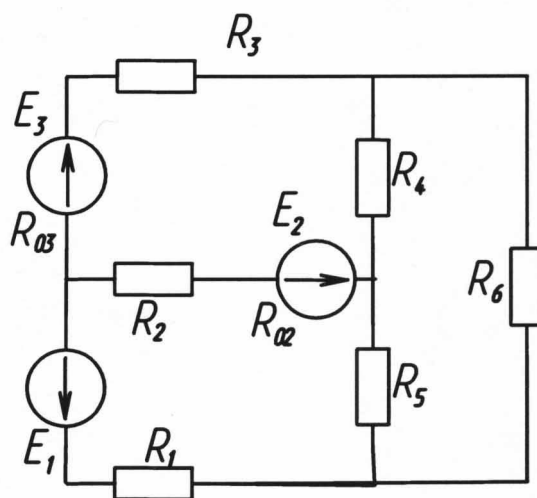
44



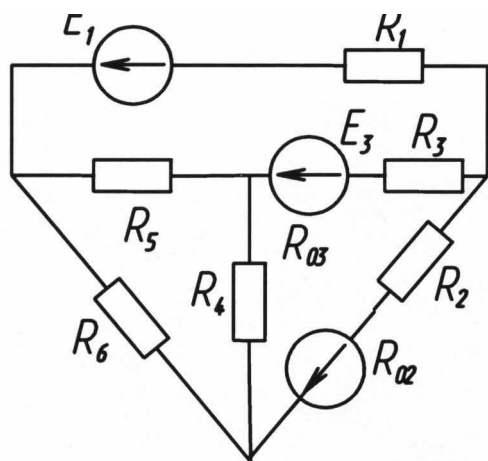
45



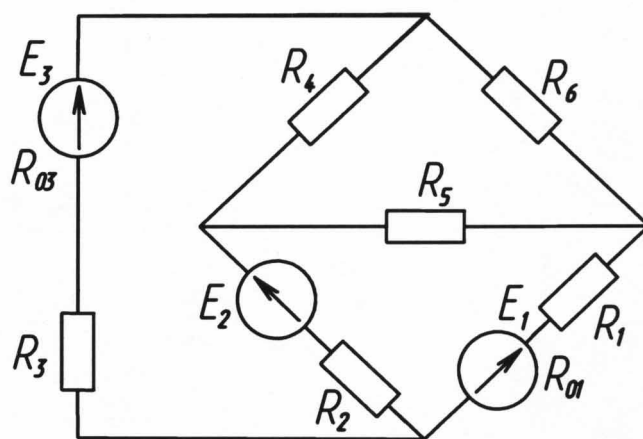
46



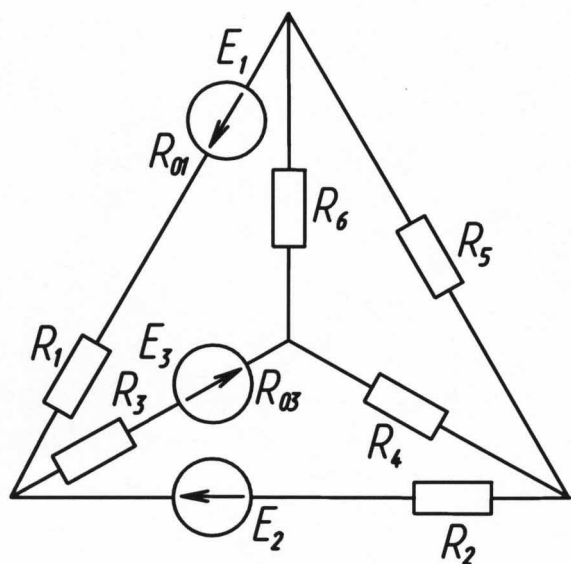
47



48



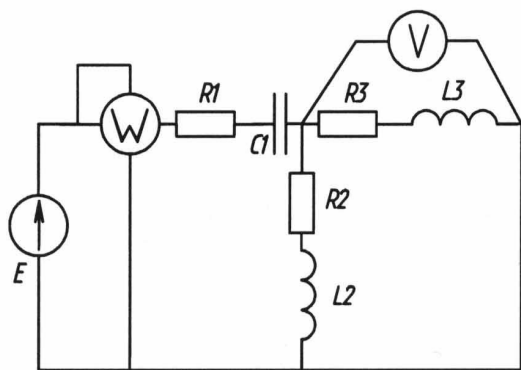
49



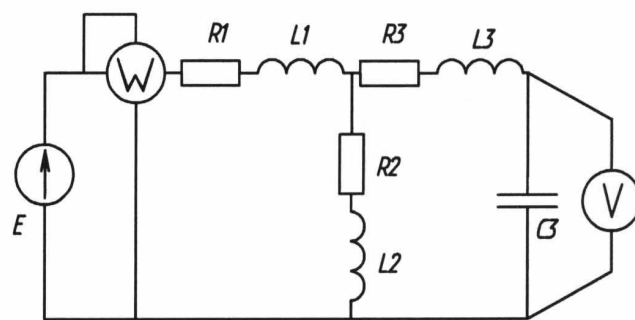
50

Вхідні дані

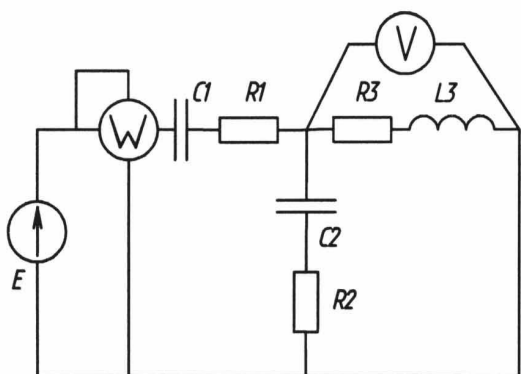
№ вар-та	№ рис.	Е, В	f, Гц	C ₁ , мкФ	C ₂ , мкФ	C ₃ , мкФ	L ₁ , мГн	L ₂ , мГн	L ₃ , мГн	R ₁ , Ом	R ₂ , Ом	R ₃ , Ом
0	1	100	50	∞	-	-	-	31	17	0	2	20
1	2	150	50	-	-	100	0	15	15	0	4	10
2	3	120	50	∞	312	-	-	-	16	0	2	20
3	4	100	50	-	150	-	0	-	14	0	3	30
4	5	50	50	∞	-	200	-	30	-	0	-	40
5	4	150	50	-	120	-	0	-	17	0	6	6
6	6	200	50	0	320	-	0	-	31	0	-	7
7	7	220	50	-	-	220	0	-	∞	0	12	12
8	8	120	50	-	632	-	-	-	11	0	6	16
9	9	150	50	-	159	-	0	-	-	0	8	18
10	10	50	50	-	100	-	0	-	10	0	-	24
11	11	100	50	∞	-	120	-	18	-	-	12	20
12	12	220	50	-	220	120	0	-	-	0	-	5
13	13	200	50	-	-	300	0	-	-	0	6	16
14	14	120	50	∞	-	230	-	15	-	0	9	10
15	15	100	50	∞	-	120	-	12	-	0	5	10
16	16	150	50	-	120	-	0	-	15	0	4	10
17	17	120	50	∞	152	-	0	-	24	0	4	14
18	18	200	50	∞	-	218	-	37	-	-	7	10
19	19	100	50	∞	-	638	-	31	-	0	8	10
20	20	120	50	-	150	120	0	-	-	-	6	6
21	21	150	50	-	120	220	0	-	-	0	-	10
22	22	200	50	-	300	100	0	-	-	-	8	12
23	23	220	50	∞	-	300	-	21	-	0	-	22
24	24	100	50	∞	230	-	-	-	95	-	10	15
25	25	120	50	-	210	-	0	-	12	0	11	25
26	26	150	50	∞	160	-	-	-	140	0	-	20
27	27	200	50	-	120	-	0	-	61	0	8	-
28	28	50	50	-	180	-	0	-	54	0	-	10
29	29	220	50	∞	-	200	-	9	-	0	-	40
30	30	50	50	∞	300	-	-	-	97	-	8	40
31	31	100	50	∞	-	0	-	-	21	-	9	20
32	32	120	50	-	-	330	0	29	63	0	-	15
33	33	120	50	∞	-	100	0	24	-	0	6	60
34	34	120	50	∞	-	200	-	30	43	-	5	∞
35	35	100	50	-	120	-	0	-	32	0	14	4
36	36	150	50	∞	-	0	0	45	95	0	-	6
37	37	100	50	∞	-	600	-	19	-	0	4	40
38	38	200	50	-	159	100	0	-	63	0	-	4
39	39	220	50	-	-	200	0	23	44	0	-	∞
40	40	100	50	∞	-	200	0	12	0	0	6	16
41	41	50	50	-	241	220	0	-	-	0	7	7
42	42	120	50	∞	-	-	-	30	45	0	-	7
43	43	50	50	∞	-	100	-	8	-	0	13	∞
44	44	100	50	-	244	120	0	-	85	-	16	∞
45	45	200	50	∞	245	120	0	-	17	-	8	0
46	46	220	50	∞	-	-	-	14	13	0	-	80
47	47	120	50	∞	120	200	0	21	0	0	8	40
48	48	150	50	∞	380	200	-	-	15	0	-	17
49	49	100	50	-	600	-	0	11	19	0	11	21
50	50	50	50	-	250	-	0	-	21	0	10	20



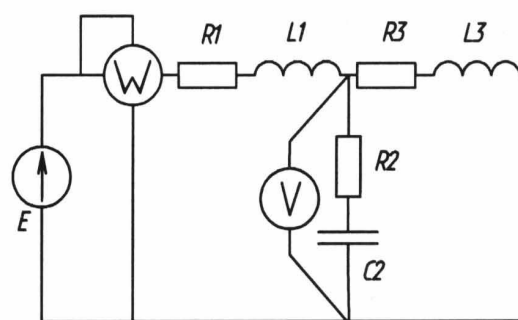
1



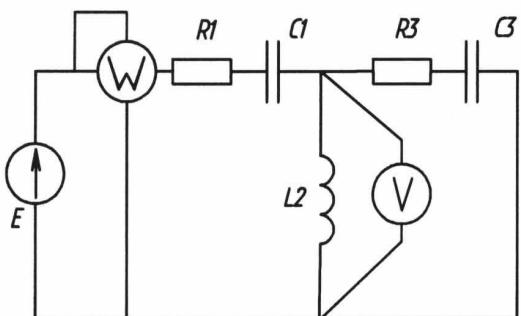
2



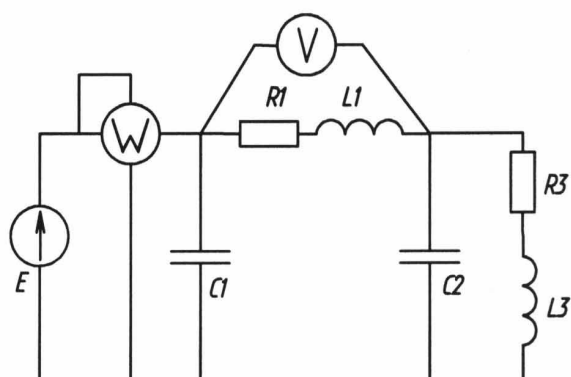
3



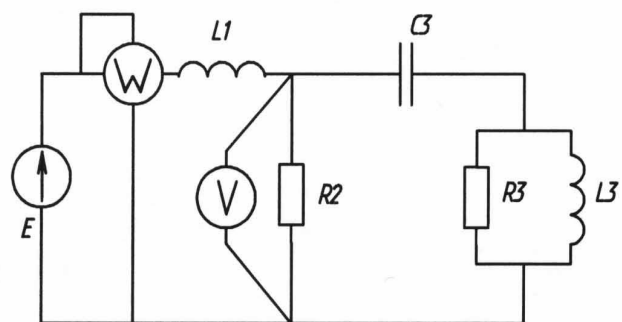
4



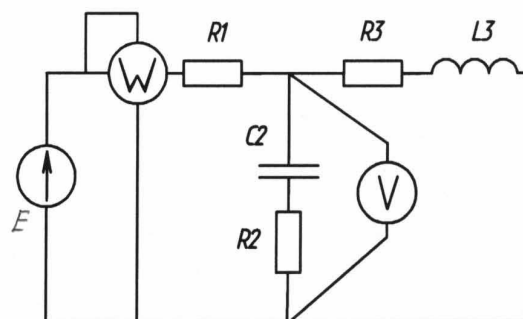
5



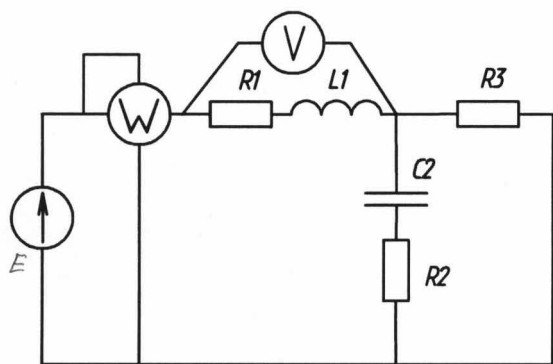
6



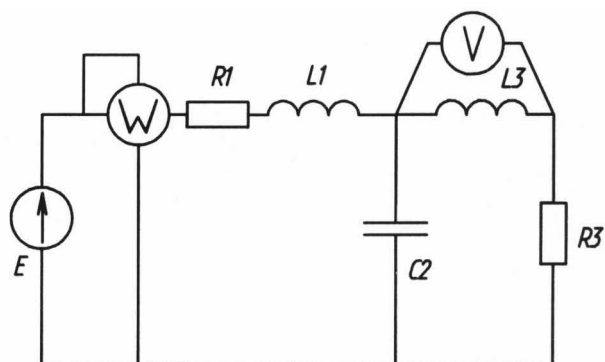
7



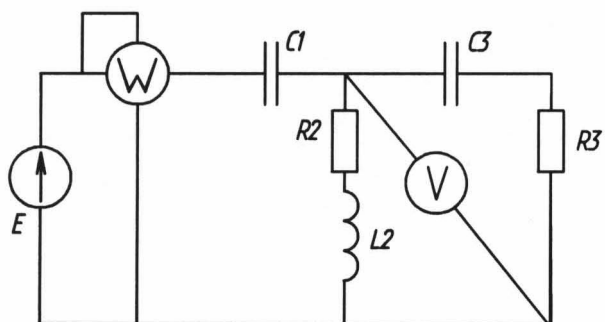
8



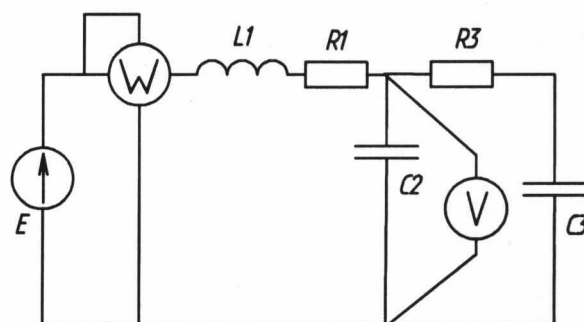
9



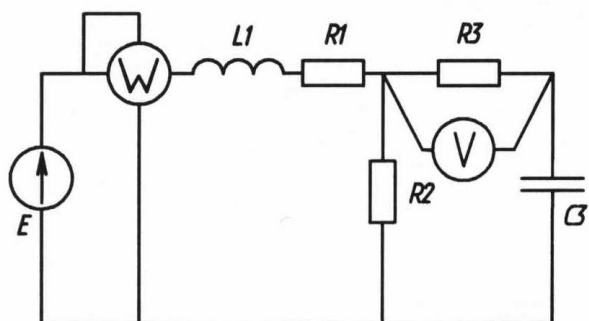
10



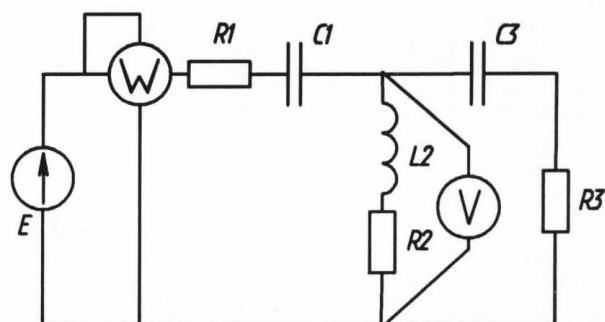
11



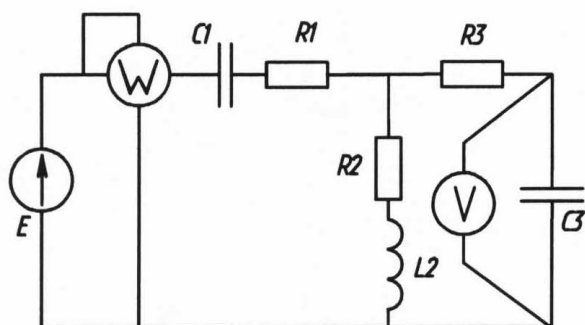
12



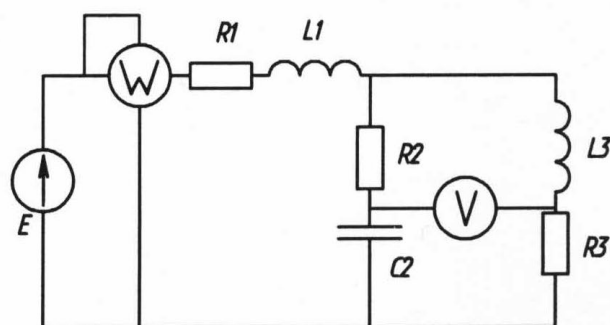
13



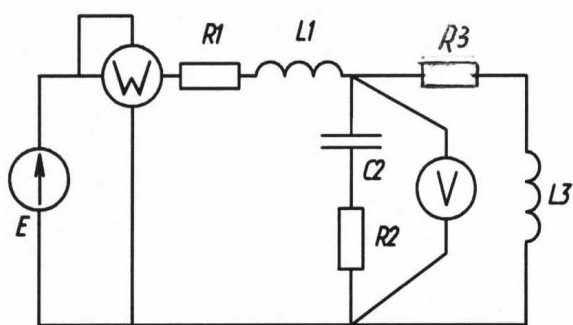
14



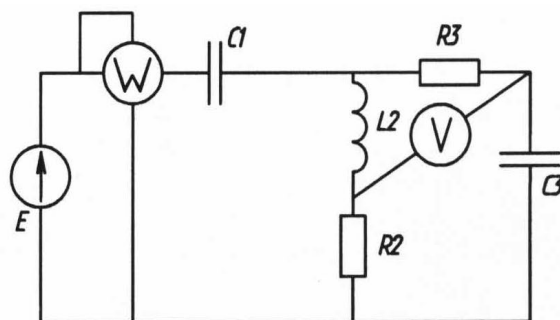
15



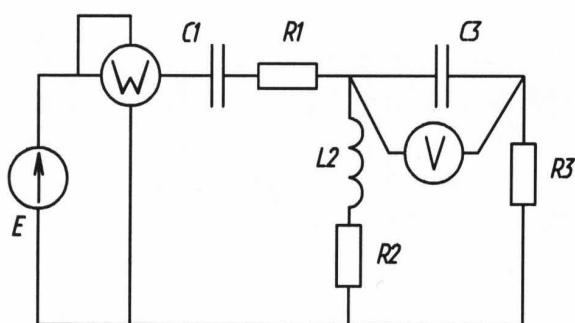
16



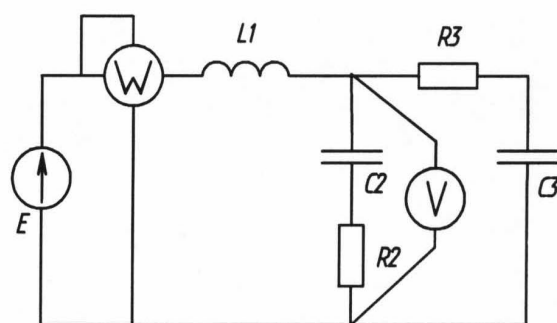
17



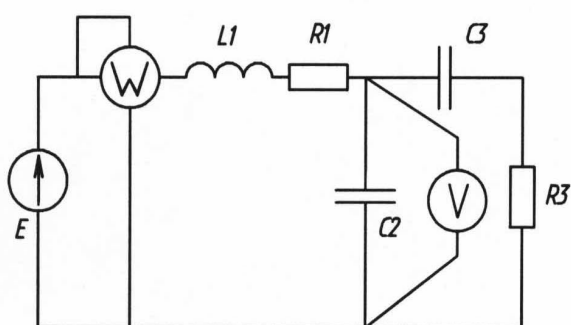
18



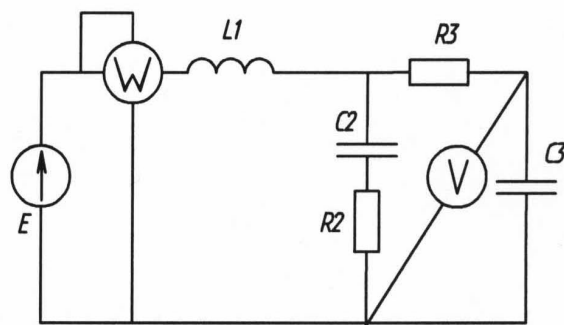
19



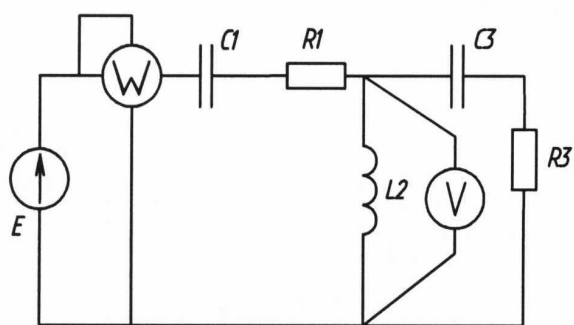
20



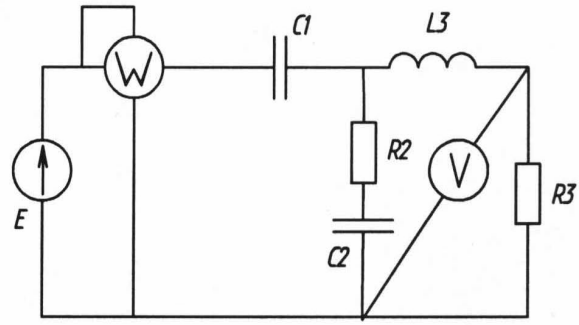
21



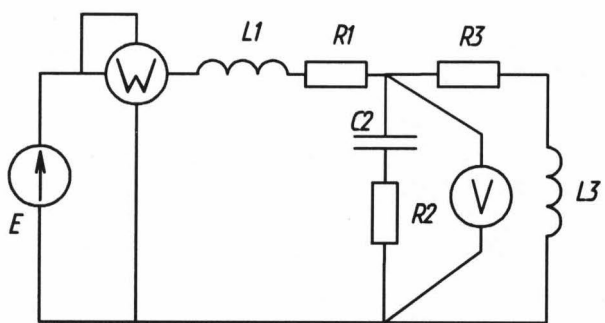
22



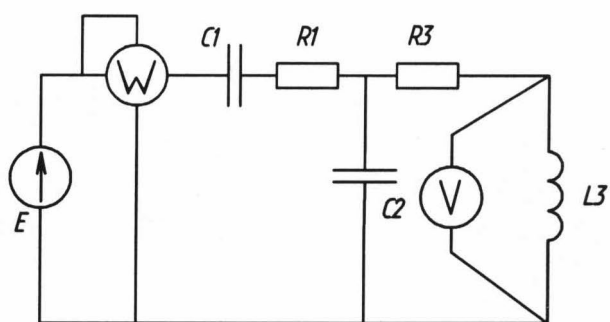
23



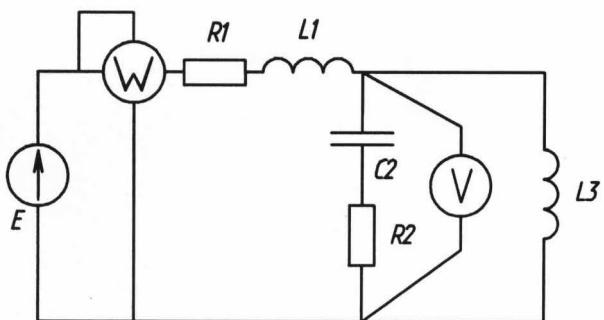
24



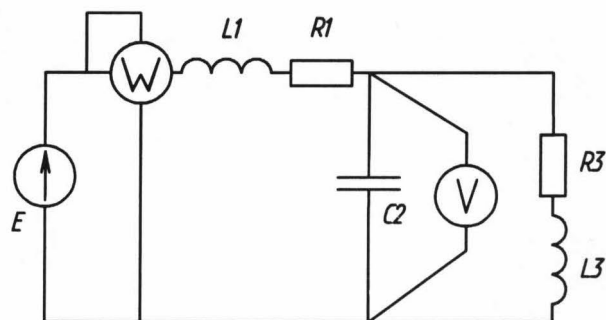
25



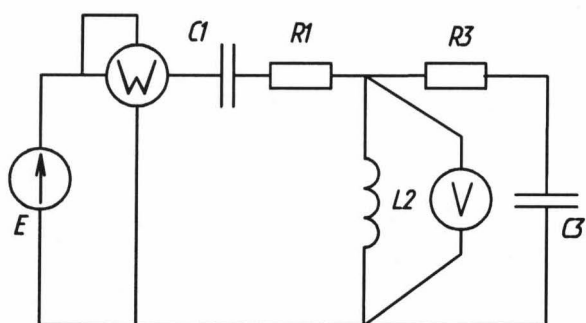
26



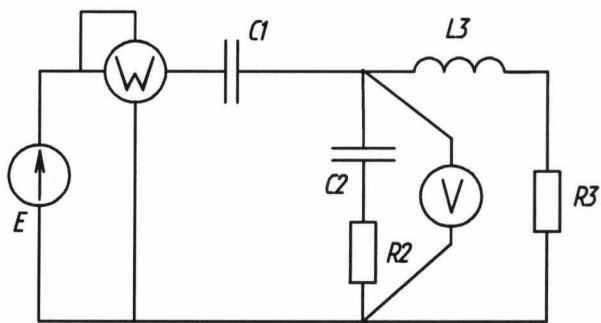
27



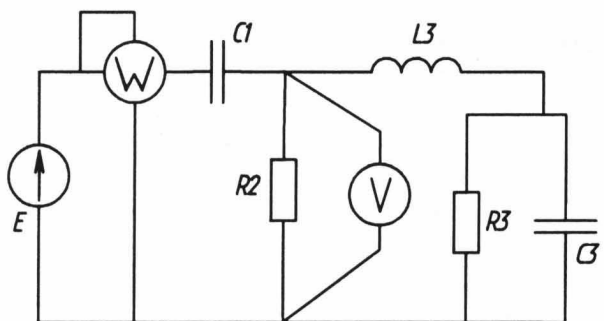
28



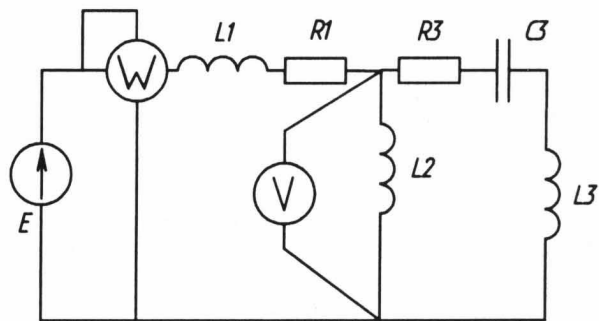
29



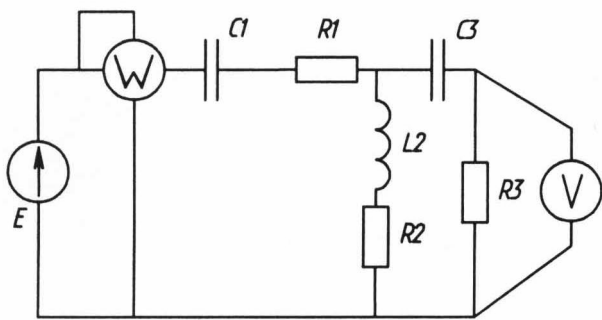
30



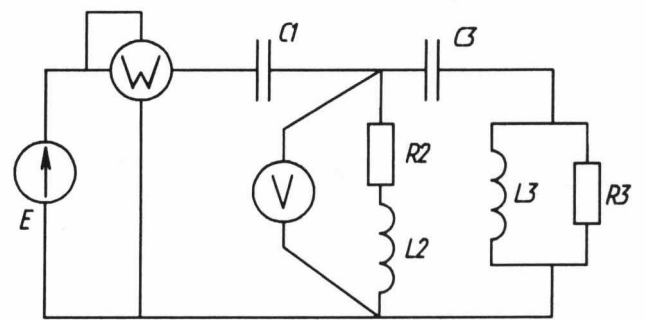
31



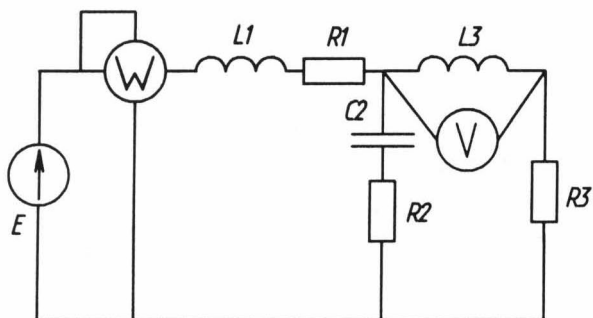
32



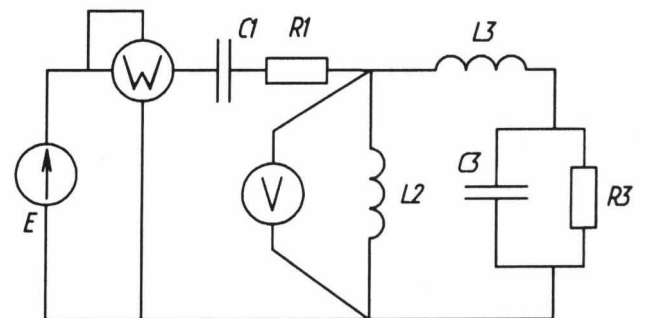
33



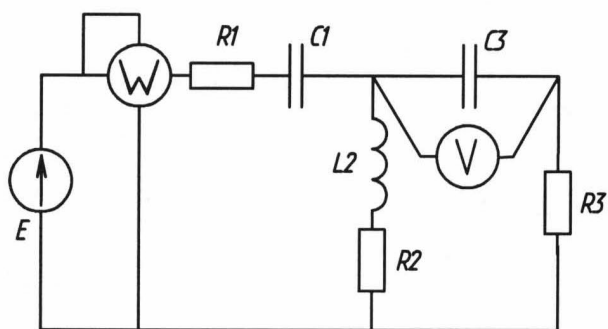
34



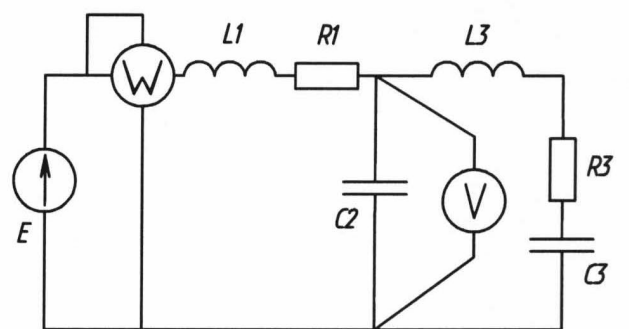
35



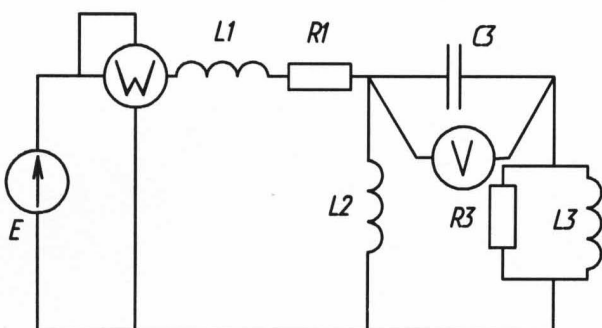
36



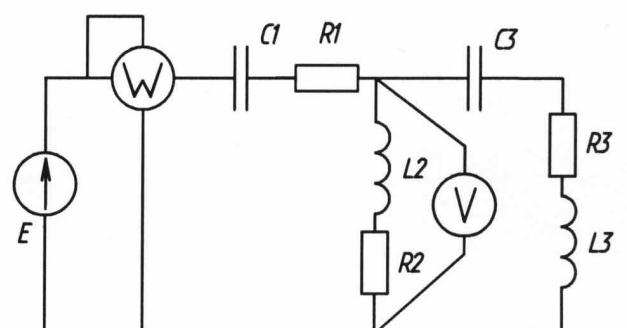
37



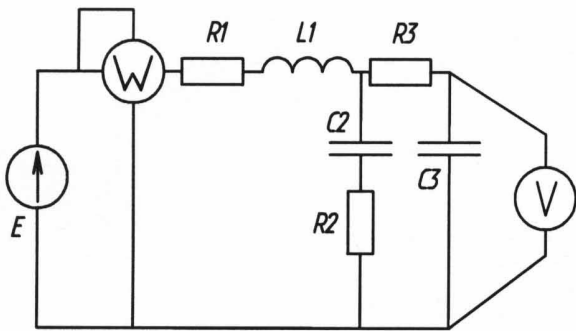
38



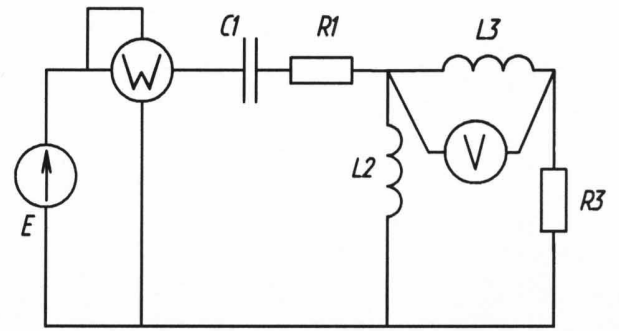
39



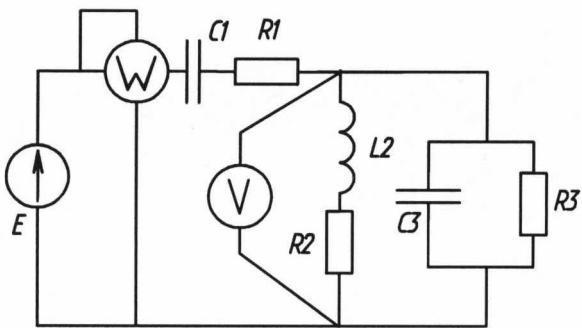
40



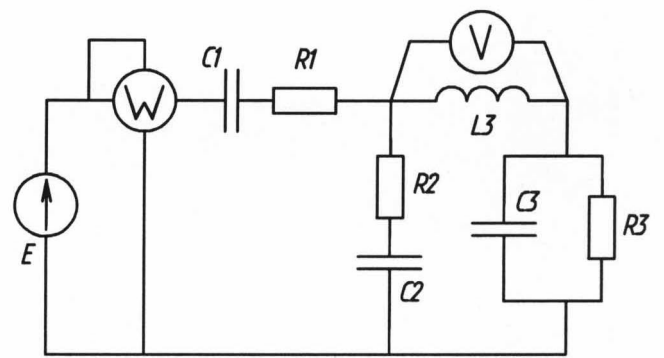
41



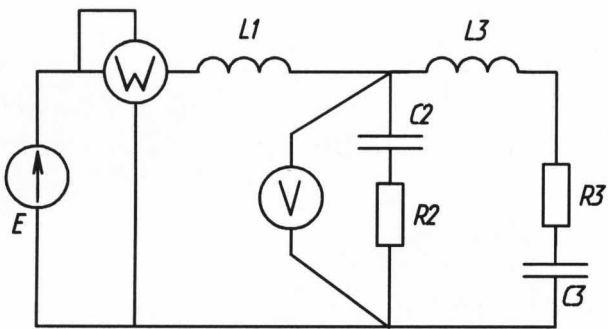
42



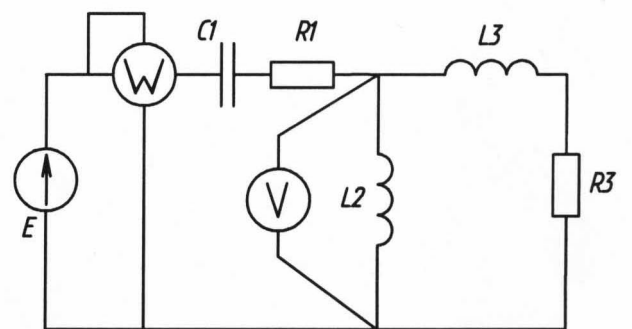
43



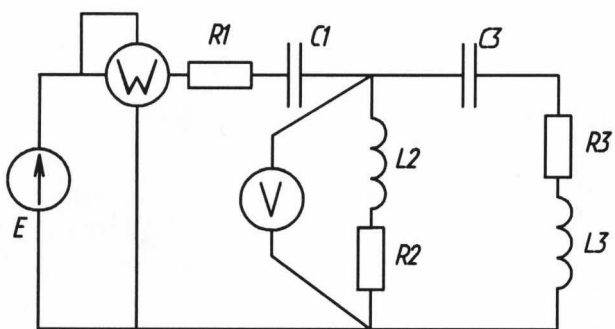
44



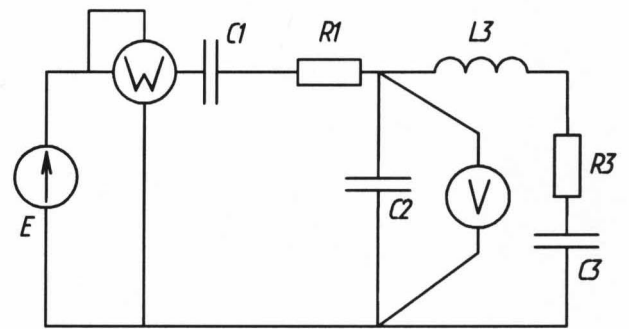
45



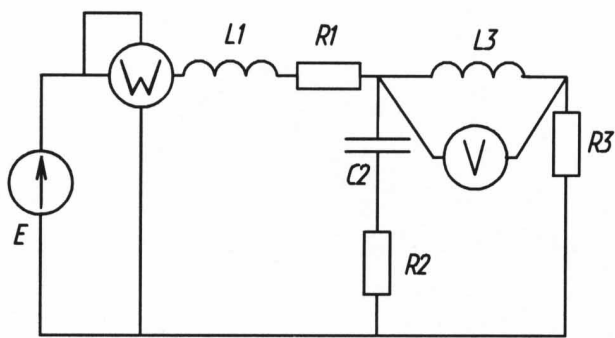
46



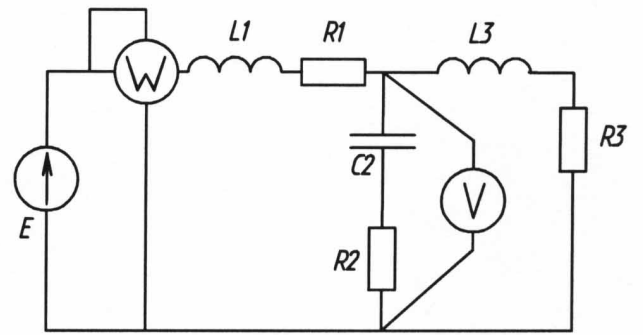
47



48

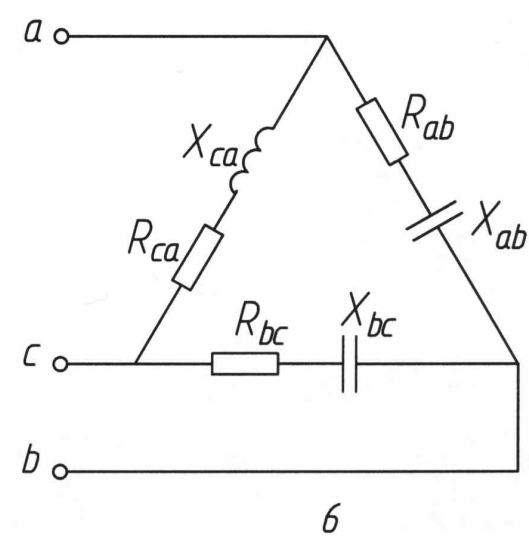
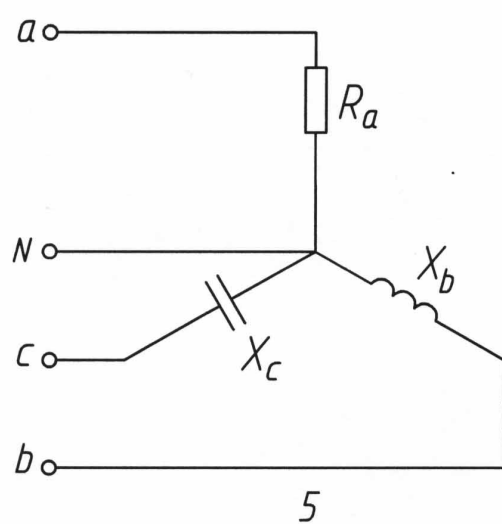
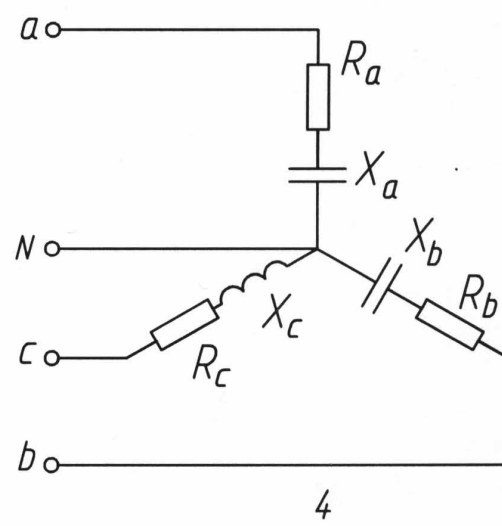
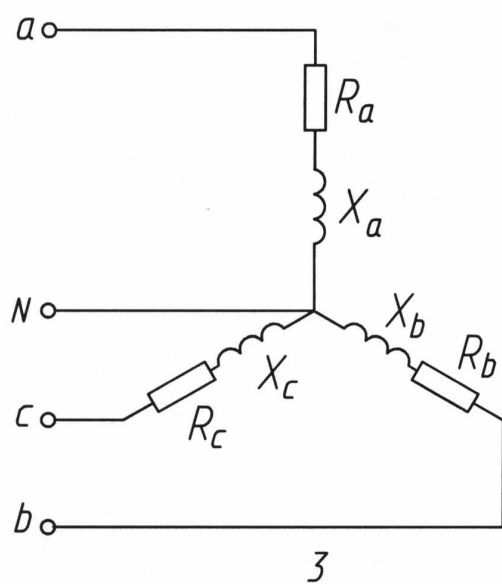
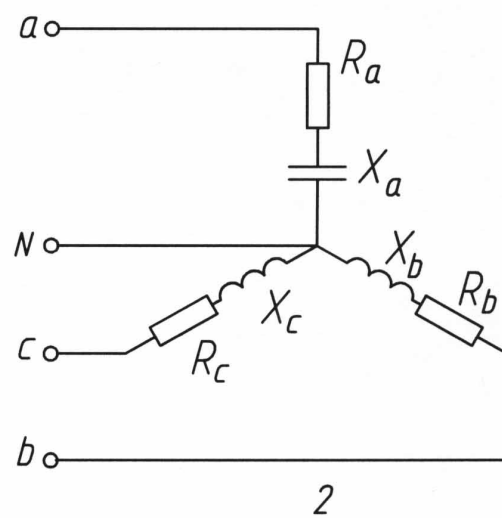
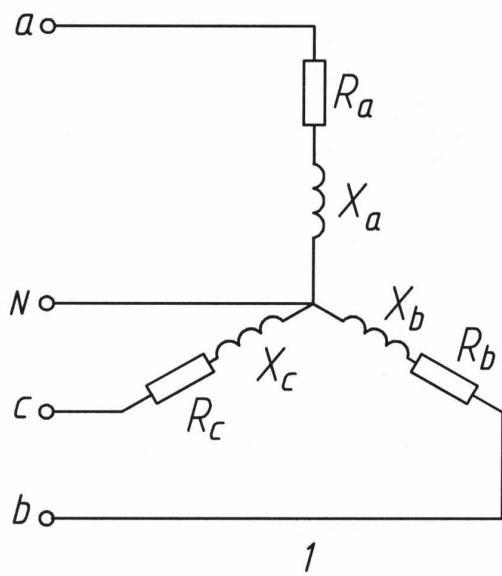


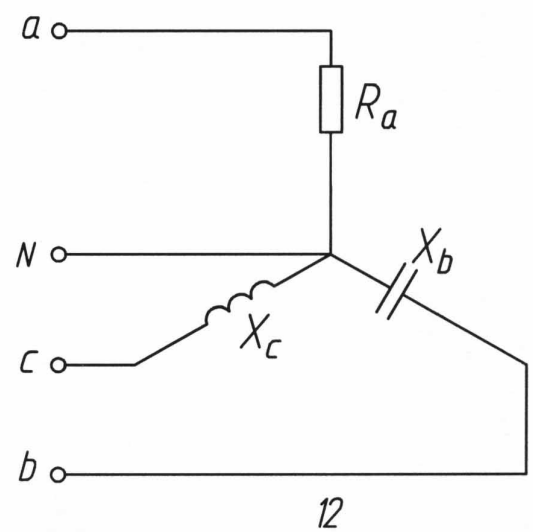
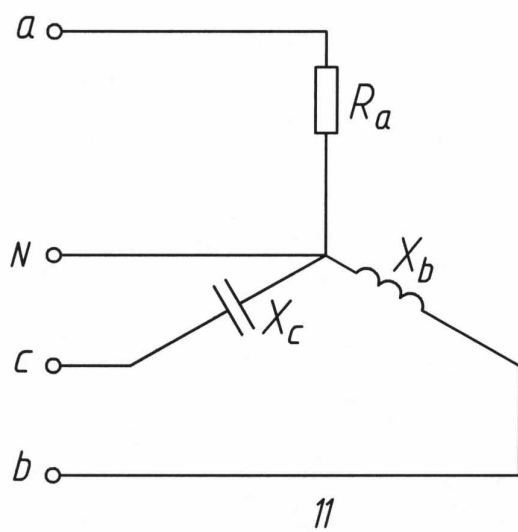
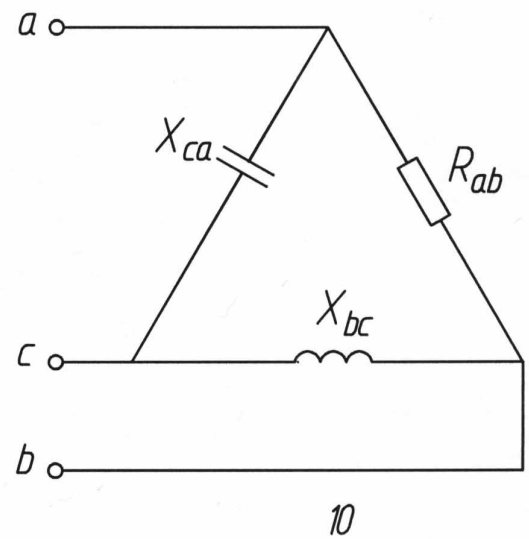
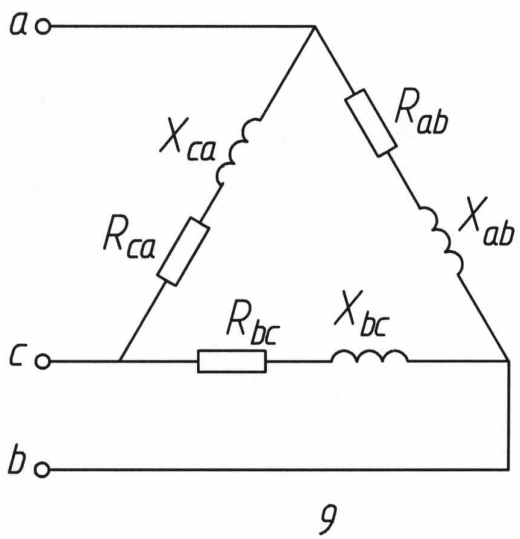
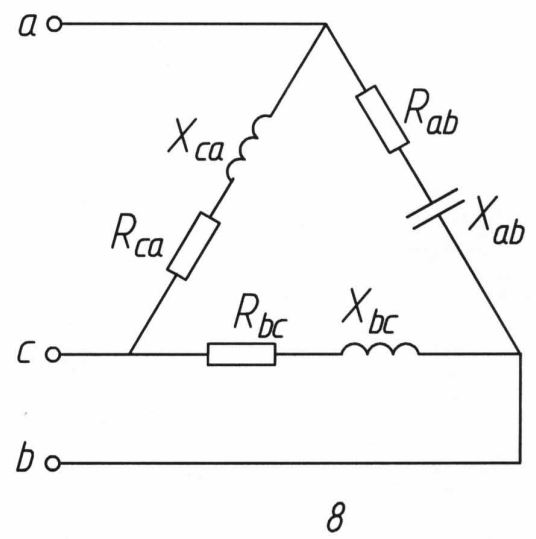
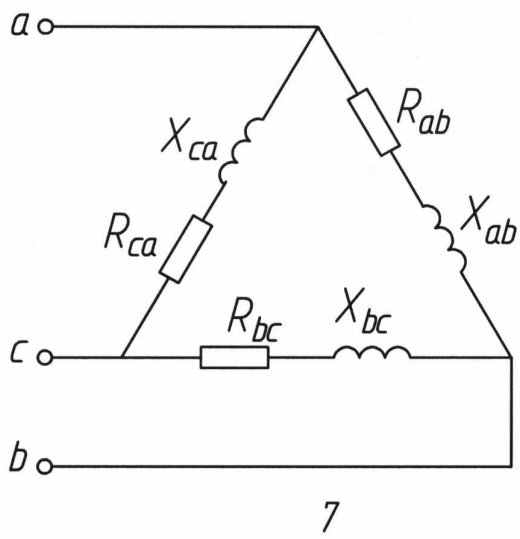
49

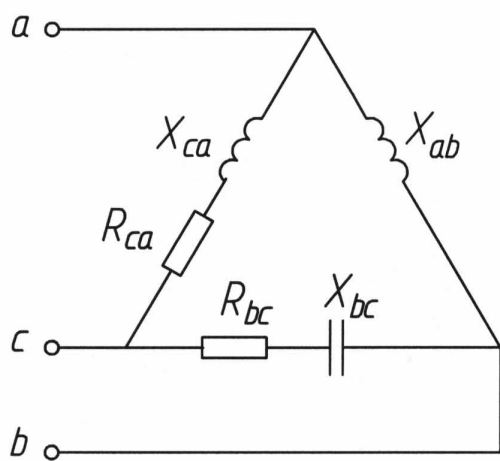


50

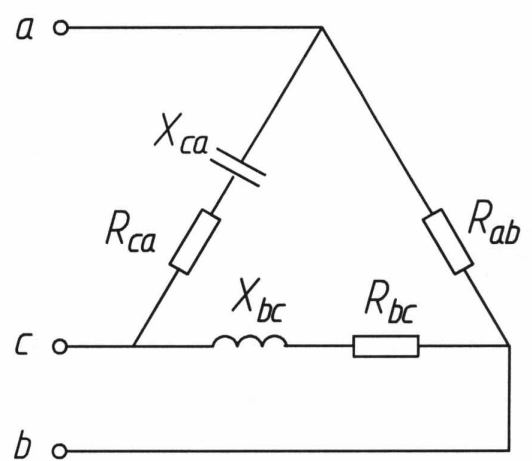
Вхідні дані														
№ вар- та	№ рис.	U _л , В	R _а , Ом	R _б , Ом	R _с , Ом	x _а , Ом	x _б , Ом	x _с , Ом	R _{ab} , Ом	R _{bc} , Ом	R _{ca} , Ом	x _{ab} , Ом	x _{bc} , Ом	x _{ca} , Ом
0	1	127	9	9	9	7	7	7	-	-	-	-	-	-
1	1	220	9	9	9	7	7	7	-	-	-	-	-	-
2	1	380	9	9	9	7	7	7	-	-	-	-	-	-
3	2	127	4	5	7	5	2	9	-	-	-	-	-	-
4	2	220	9	5	7	5	2	9	-	-	-	-	-	-
5	2	380	9	5	7	5	2	9	-	-	-	-	-	-
6	3	127	5	9	7	2	5	9	-	-	-	-	-	-
7	3	220	5	9	7	2	5	8	-	-	-	-	-	-
8	3	380	5	2	7	9	5	9	-	-	-	-	-	-
9	4	127	17,8	9	9	15,2	7	5	-	-	-	-	-	-
10	4	220	17,8	9	9	15,2	7	5	-	-	-	-	-	-
11	4	380	17,8	9	9	9	7	5	-	-	-	-	-	-
12	5	127	11	-	-	-	11	11	-	-	-	-	-	-
13	5	220	11	-	-	-	11	11	-	-	-	-	-	-
14	5	380	11	-	-	-	11	11	-	-	-	-	-	-
15	6	127	-	-	-	-	-	-	9	9	9	7	7	7
16	6	220	-	-	-	-	-	-	9	9	9	7	7	7
17	6	380	-	-	-	-	-	-	9	9	9	7	7	7
18	7	127	-	-	-	-	-	-	9	5	7	5	2	9
19	7	220	-	-	-	-	-	-	9	5	7	5	2	9
20	7	380	-	-	-	-	-	-	9	5	7	5	2	9
21	8	127	-	-	-	-	-	-	5	9	7	2	5	9
22	8	220	-	-	-	-	-	-	5	9	7	2	5	9
23	8	380	-	-	-	-	-	-	5	9	7	2	5	9
24	9	127	-	-	-	-	-	-	17,8	9	2	15,2	7	5
25	9	220	-	-	-	-	-	-	17,8	9	2	15,2	7	5
26	9	380	-	-	-	-	-	-	17,8	9	2	15,2	7	5
27	10	127	-	-	-	-	-	-	11	-	-	-	11	11
28	10	220	-	-	-	-	-	-	11	-	-	-	11	11
29	10	380	-	-	-	-	-	-	11	-	-	-	11	11
30	11	127	11	-	-	-	11	11	-	-	-	-	-	-
31	11	220	11	-	-	-	11	11	-	-	-	-	-	-
32	11	380	11	-	-	-	11	11	-	-	-	-	-	-
33	12	127	14	-	-	-	4	4	-	-	-	-	-	-
34	12	220	14	-	-	-	4	4	-	-	-	-	-	-
35	12	380	14	-	-	-	4	4	-	-	-	-	-	-
36	13	127	-	-	-	-	-	-	-	2	9	5	7	9
37	13	220	-	-	-	-	-	-	-	2	9	5	7	9
38	13	380	-	-	-	-	-	-	-	2	9	5	7	9
39	14	127	-	-	-	-	-	-	9	5	9	-	7	11
40	14	220	-	-	-	-	-	-	9	5	9	-	7	11
41	14	380	-	-	-	-	-	-	9	5	9	-	7	11
42	15	127	-	-	-	-	-	-	-	4	7	4	9	5
43	15	220	-	-	-	-	-	-	-	4	7	4	9	5
44	15	380	-	-	-	-	-	-	-	4	7	4	9	5
45	16	127	-	-	-	-	-	-	4	-	7	11	9	5
46	16	220	-	-	-	-	-	-	4	-	7	11	9	5
47	16	380	-	-	-	-	-	-	4	-	7	11	9	5
48	17	127	-	2	-	14	-	11	-	-	-	-	-	-
49	17	220	-	2	-	14	-	11	-	-	-	-	-	-
50	17	380	-	2	-	14	-	11	-	-	-	-	-	-



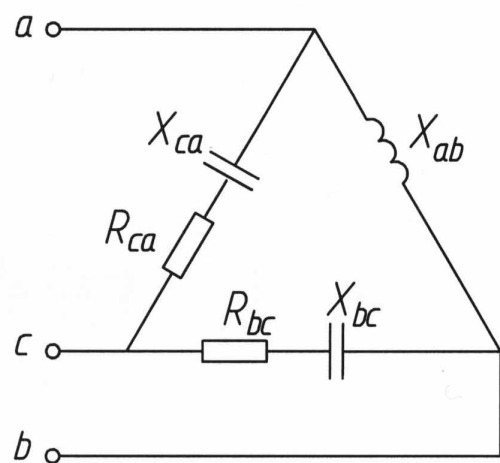




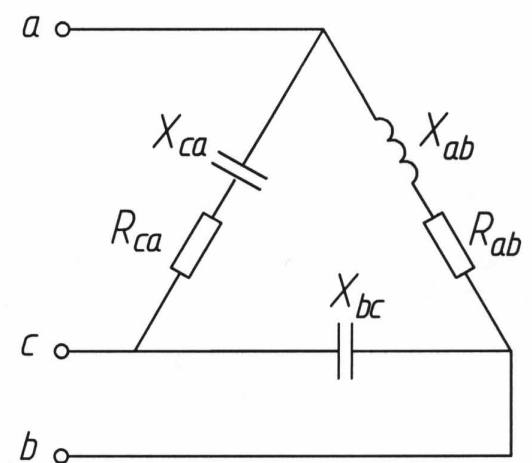
13



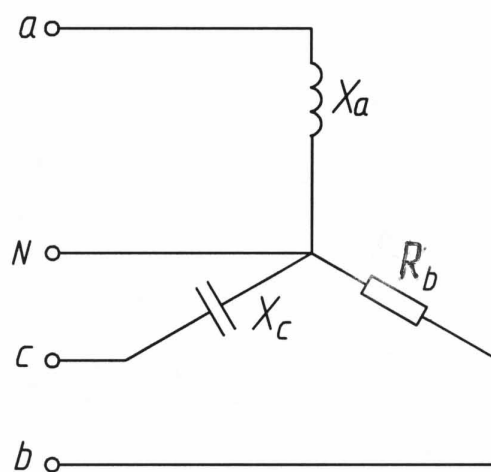
14



15



16



17

Навчальне видання

ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

Робоча програма та методичні вказівки до розрахунково-графічної
роботи
для студентів денної та заочної форм навчання
за напрямом підготовки 151 – «Автоматизація та комп'ютерно-
інтегровані технології»

Укладачі: Рожкова Світлана Едуардівна
Рожков Петро Павлович

Відповідальний за випуск Бажинов О.В.

Редактор

План _____, поз. _____	Формат 60×80 1/16	Папір газетний
Підписано до друку	Умов. друк. арк.	Обл.-вид. арк.
Віддруковано на ризографі	Тираж прим.	Ціна договірна
Замовлення №		

ХНАДУ, 61002, Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25

Підготовлено і віддруковано видавництвом Харківського національного
автомобільно-дорожнього університету