

**УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ**

МЕХАНІКО-ЕНЕРГЕТИЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ

Кафедра електроенергетики, електротехніки та електромеханіки

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ТА ЗАВДАННЯ
до виконання розрахунково-графічної роботи**

з дисципліни

«ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ»

розділ

«ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА

З ІНДУКТИВНО ЗВ'ЯЗАНИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ»

Харків 2024

Методичні вказівки розглянуто і рекомендовано до друку на засіданні кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки 25 жовтня 2024 р., протокол № 4.

Рекомендовано для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня зі спеціальностей 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», 273 «Залізничний транспорт» механіко-енергетичного факультету денної форми навчання.

Укладачі:

доценти М. Г. Давиденко,
О. Є. Зінченко

Рецензент

проф. О. М. Ананьєва

ЗМІСТ

Вступ.....	4
1 Основні теоретичні відомості.....	5
2 Розрахункова частина.....	17
2.1 Вихідні дані для розрахунку.....	17
2.2 Зміст завдання.....	17
3 Експериментальна частина.....	34
3.1 Мета роботи.....	34
3.2 Опис вимірювальної установки.....	34
3.3 Завдання на експеримент.....	34
3.4 Опрацювання результатів експерименту.....	38
Список літератури.....	40

ВСТУП

Магнітне поле є неодмінним оточенням будь-якого провідника, яким протікає електричний струм. Якщо цей провідник не охоплено спеціальною екрануючою конструкцією, то таке поле сягає навіть нескінченно віддалених від провідника точок простору. При цьому його напруженість зменшується з відстанню і тому магнітне поле (а відтак – і струм, що його утворив) відчутно впливає лише на елементи пристрою, що досить близько розташовані до згаданого провідника. Коли провідником протікає змінний в часі струм, то й утворене ним магнітне поле також змінне в часі, і за законом електромагнітної індукції це змінне поле викликає в усіх охоплених ним провідниках електрорушійну силу (ЕРС) індукції. Тому якщо змінний струм в першому елементі електричного кола викликає ЕРС в другому елементі цього кола, то кажуть, що між першим та другим елементами існує індуктивний (інколи кажуть – магнітний) зв'язок. Зазвичай магнітні властивості середовища (наприклад повітря), в якому знаходиться електричне коло, є такими, що змінний струм в згаданому другому елементі цього кола здійснює аналогічний вплив на перший елемент. Такий взаємний вплив через магнітне поле називають взаємоіндукцією, а обидва ці елементи кола називають індуктивно зв'язаними. Явище взаємоіндуктивного зв'язку лежить в основі роботи всіх трансформаторів, трансформаторних датчиків, електричних двигунів більшості типів, індукційних нагрівачів, деяких видів вимірювачів. При конструюванні або ремонті засобів автоматики, радіоелектроніки та електропостачання завжди слід враховувати можливість виникнення небажаного взаємоіндуктивного зв'язку, який призведе до незадовільної роботи цих засобів. Отже, розрахунок електричних кіл з індуктивно зв'язаними елементами являє собою поширену і невід'ємну складову

розроблення та експлуатації вузлів, пристроїв і систем, в основу роботи яких покладені електромагнітні явища.

Метою виконання розрахунково-графічної роботи є закріплення та поглиблення навичок з математичного описання електричних кіл з індуктивним зв'язком і з отримання числових характеристик струмів, напруг і параметрів таких кіл. У результаті опрацювання завдань цієї роботи її виконавець знатиме методику врахування індуктивного зв'язку, основні співвідношення між струмами, напругами та параметрами відповідних електричних кіл. Він також умітиме поширювати набуті теоретичні знання та прийоми розрахунку на притаманні практичним потребам електричні кола більш складного вигляду.

Виконані завдання оформлюють у вигляді звітів.

Звіт має бути складений з таких компонентів:

- титульний аркуш;
- принципова електрична схема кола, яке підлягає розрахунку, та вихідні числові дані до розрахунку згідно з номером варіанта, виданим викладачем-керівником цієї роботи;
- опис ходу розрахунку включно з письмовим поясненням виконуваних дій, з розрахунковими формулами як у загальному вигляді («в літерах»), так і після підстановки до них відповідних числових даних;
- графічні побудови згідно з вимогами завдання.

1 ОСНОВНІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Розглянемо дві магнітно зв'язані котушки індуктивності. Як відомо, кількісною характеристикою магнітного поля окремої котушки є її потокозчеплення Ψ , що дорівнює сумі магнітних потоків, пронизуючих кожен з її витків. За наявності взаємоіндуктивного зв'язку між двома котушками повне потокозчеплення кожної котушки складається з її

власного потокозчеплення, утвореного магнітним полем протікаючого крізь цю котушку струму, та з додаткового («взаємного») потокозчеплення, яке надходить від другої котушки. Цю картину просторового розподілу потокозчеплень проілюстровано рисунком 1.1 (для запобігання візуальному захаращенню кожна з котушок показано у вигляді одиночного витка). Зауважимо, на цьому рисунку вказані *миттєві значення* електричних та магнітних величин, а відтак всі наведені нижче формули (по формулу (1.10) включно) справедливі для *будь-яких залежностей* $i_1(t)$ та $i_2(t)$ струмів, що породжують описувані явища.

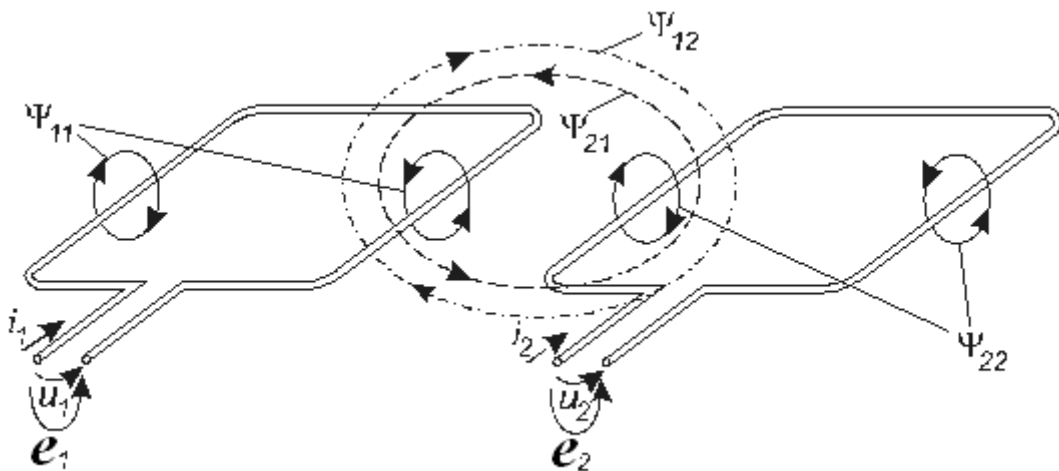


Рисунок 1.1

Повне потокозчеплення Ψ_1 першої котушки є сумою її власного потокозчеплення Ψ_{11} та взаємного потокозчеплення Ψ_{12} , яке надійшло від другої котушки [1, 2]. Залежно від напрямів струмів i_1 та i_2 в котушках та від взаємного розташування котушок магнітний потік другої котушки може змінювати напрям, тому величина Ψ_{12} може додаватися до Ψ_{11} або відніматися від неї:

$$\Psi_1 = \Psi_{11} \pm \Psi_{12}. \quad (1.1)$$

Аналогічно повне потокозчеплення Ψ_2 другої котушки є сумою її власного потокозчеплення Ψ_{22} та взаємного потокозчеплення Ψ_{21} , яке надійшло від першої котушки:

$$\Psi_2 = \Psi_{22} \pm \Psi_{21}. \quad (1.2)$$

Миттєве значення Ψ_{12} взаємного потокозчеплення, яке надійшло від другої котушки в першу, прямо пропорційне миттєвому значенню i_2 струму другої котушки:

$$\Psi_{12} = M_{12} \cdot i_2. \quad (1.3)$$

Коефіцієнт пропорційності M_{12} має назву взаємної індуктивності першої та другої котушок.

Миттєве значення Ψ_{21} взаємного потокозчеплення, яке надійшло від першої котушки в другу, прямо пропорційне миттєвому значенню i_1 струму першої котушки:

$$\Psi_{21} = M_{21} \cdot i_1. \quad (1.4)$$

Коефіцієнт пропорційності M_{21} має назву взаємної індуктивності другої та першої котушок. У переважній більшості практичних випадків ділянка кола з обома котушками знаходиться в середовищі, магнітні властивості якого не залежать від напрямку магнітного поля (магнітно ізотропному середовищі як, наприклад, повітря). У цьому випадку взаємні індуктивності мають однакові величини:

$$M_{12} = M_{21} = M. \quad (1.5)$$

Якщо взаємні потокозчеплення в формулах (1.1) та (1.2) додаються до власних потокозчеплень котушок, то кажуть, що котушки ввімкнені

узгоджено. Якщо ж взаємні потокозчеплення віднімаються від власних потокозчеплень, то кажуть, що ці дві котушки ввімкнені *зустрічно*. Рисунок 1.1 ілюструє випадок саме зустрічного ввімкнення. На принципіальних електричних схемах наявність індуктивного зв'язку між котушками позначають двонаправленою стрілкою, поруч з якою стоїть літера **M**. При цьому кінці стрілки вказують на одну з двох наявних пар так званих *однойменних затискачів*. Це такі затискачі, що при однаковій направленості відносно них струмів в обох котушках ці котушки виявляються ввімкненими узгоджено, а при різній направленості струмів – ввімкненими зустрічно. На рисунку 1.2, *а* показане умовне позначення котушок, що ввімкнені узгоджено, а на рисунку 1.2, *б* – котушок, що ввімкнені зустрічно (як L_1 та L_2 позначені власні індуктивності відповідно першої та другої котушок).

За законом електромагнітної індукції, електрорушійна сила (ЕРС), що виникає в котушці, яку пронизує змінний магнітний потік, дорівнює швидкості зміни цього потоку в часі. Тому миттєве значення ЕРС першої котушки визначає вираз

$$e_1 = -\frac{d\psi_1}{dt} = -\frac{d\psi_{11}}{dt} \mp \frac{d\psi_{12}}{dt}. \quad (1.6)$$

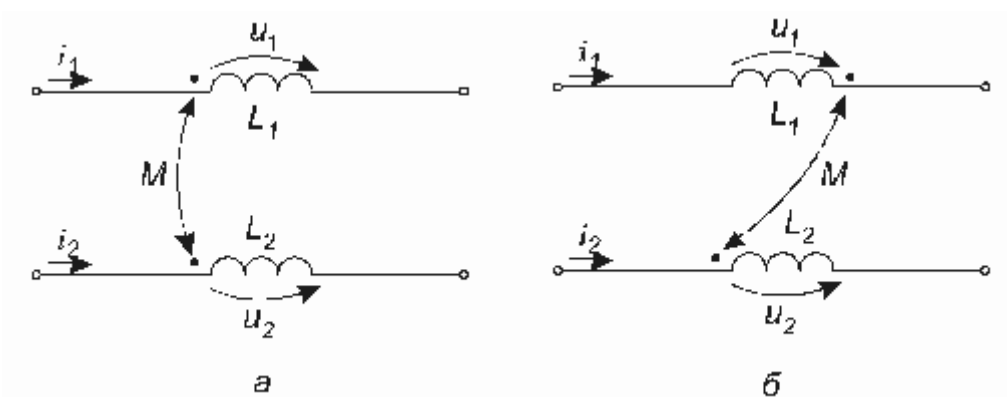


Рисунок 1.2

Як відомо, власне потокозчеплення будь-якої котушки дорівнює добутку її індуктивності та струму в ній. Тому

$$\Psi_{11} = L_1 i_1, \quad (1.7)$$

і підставивши цей вираз, а також формулу (1.3) для Ψ_{12} до виразу (1.6) отримаємо повну ЕРС першої котушки у вигляді

$$e_1 = -L_1 \frac{di_1}{dt} \mp M \frac{di_2}{dt} = e_{1L} \pm e_{1M}. \quad (1.8)$$

Отже, повна ЕРС першої котушки дорівнює сумі ЕРС самоіндукції (перший доданок) та ЕРС взаємної індукції (другий доданок). Як відомо, напруга на будь-якій котушці націлена протилежно ЕРС цієї котушки, тому повну напругу u_1 на першій котушці визначає вираз

$$u_1 = -e_1 = L_1 \frac{di_1}{dt} \pm M \frac{di_2}{dt}. \quad (1.9)$$

За аналогічними міркуваннями, повну напругу u_2 на другій котушці визначає вираз

$$u_2 = L_2 \frac{di_2}{dt} \pm M \frac{di_1}{dt}. \quad (1.10)$$

В обох останніх виразах перші доданки – це напруги самоіндукції. Вони існують незалежно від наявності чи відсутності індуктивного зв'язку між котушками. Другі доданки – це напруги взаємоіндукції. Вони існують лише за наявності індуктивного зв'язку між цими двома котушками. При узгодженому ввімкненні котушок перед другими доданками формул (1.9)

та (1.10) слід обирати знак «плюс», при зустрічному ввімкненні – знак «мінус».

Конкретизуємо отримані вище вирази, справедливі для струмів та напруг довільної форми, для випадку, коли в колі діють синусоїдні струми та напруги з однаковою кутовою частотою ω . Для цього замінимо миттєві значення електричних коливань на комплекси їх миттєвих значень:

$$\underline{i} = I_m \cdot e^{j(\omega t + \varphi_I)} ; \quad (1.11)$$

$$\underline{u} = U_m \cdot e^{j(\omega t + \varphi_U)} . \quad (1.12)$$

Підставимо ці комплекси миттєвих значень в формулу (1.9). Отримаємо, що

$$U_{m1} \cdot e^{j(\omega t + \varphi_{U1})} = j\omega L_1 \cdot I_{m1} \cdot e^{j(\omega t + \varphi_{I1})} \pm j\omega M \cdot I_{m2} \cdot e^{j(\omega t + \varphi_{I2})} . \quad (1.13)$$

Скоротимо обидві частини цієї рівності на $e^{j\omega t}$. Матимемо вираз

$$U_{m1} \cdot e^{j\varphi_{U1}} = j\omega L_1 \cdot I_{m1} \cdot e^{j\varphi_{I1}} \pm j\omega M \cdot I_{m2} \cdot e^{j\varphi_{I2}} . \quad (1.14)$$

За відомим читачу, символічним методом розрахунку кіл синусоїдного струму вираз $U_m \cdot e^{j\varphi_U}$ описує комплексну амплітуду

\underline{U}_m напруги, вираз $I_m \cdot e^{j\varphi_I}$ описує комплексну амплітуду

\underline{I}_m струму, а $j\omega L = \underline{Z}_L$ є комплексним опором ідеальної котушки

індуктивності. Введемо позначення $j\omega M = \underline{Z}_M$ і назвемо цю

величину комплексним опором взаємної індуктивності. З цими позначеннями вираз (1.14) набуває вигляду

$$\underline{U}_{m1} = \underline{Z}_{L1} \cdot \underline{I}_{m1} \pm \underline{Z}_M \cdot \underline{I}_{m2} . \quad (1.15)$$

Поділивши обидві частини цієї рівності на $\sqrt{2}$, отримаємо аналогічний за фізичним сенсом вираз для комплексів діючих значень напруги та струмів:

$$\underline{U}_1 = \underline{Z}_{L1} \cdot \underline{I}_1 \pm \underline{Z}_M \cdot \underline{I}_2 . \quad (1.16)$$

За аналогічними міркуваннями, комплекс діючого значення повної напруги на другій котушці визначає вираз

$$\underline{U}_2 = \underline{Z}_{L2} \cdot \underline{I}_2 \pm \underline{Z}_M \cdot \underline{I}_1 . \quad (1.17)$$

Як описано вище, за першими доданками виразів (1.16) та (1.17) розраховують напруги самоіндукції кожної з котушок, а за другими доданками розраховують напруги взаємоіндукції.

Відношення фактичної взаємної індуктивності M до її максимально можливої величини $\sqrt{L_1 L_2}$ називають коефіцієнтом зв'язку:

$$K = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} . \quad (1.18)$$

Індуктивно зв'язані котушки можуть бути розташовані в колі в будь-якому сполученні: вони можуть бути з'єднаними послідовно або

паралельно, або взагалі знаходиться у вельми віддалених одна від другої вітках кола. Розглянемо випадок, в якому дві котушки з'єднані послідовно і при цьому **узгоджено**. Наявність активних опорів проводів, якими намотано ці котушки, врахуємо резисторами R_1 та R_2 . Відповідну схему наведено на рисунку 1.3.

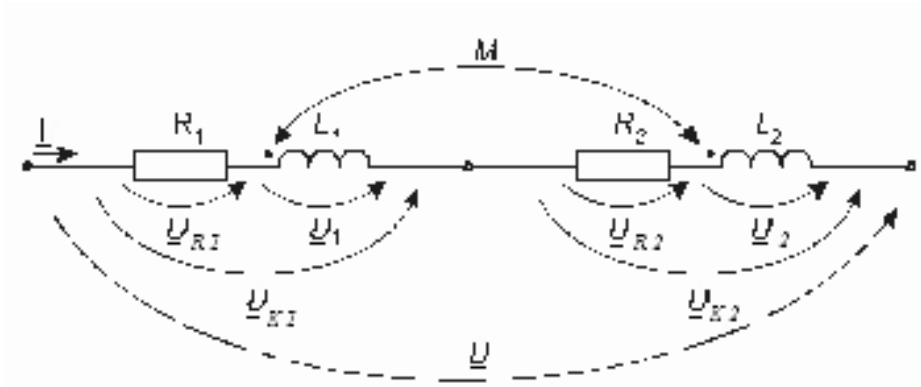


Рисунок 1.3

За другим законом Кірхгофа, загальна напруга \underline{U} дорівнює алгебраїчній сумі напруг на всіх елементах ділянки кола, що розглядається:

$$\begin{aligned} \underline{U} &= \underline{U}_{R1} + \underline{U}_1 + \underline{U}_{R2} + \underline{U}_2 = \underline{I} R_1 + \underline{I} \cdot j\omega L_1 + \underline{I} \cdot j\omega M + \underline{I} R_2 + \underline{I} j\omega L_2 + \\ &+ \underline{I} j\omega M = \underline{I} \cdot [R_1 + R_2 + j\omega(L_1 + L_2 + 2M)] \end{aligned} \quad (1.19)$$

Вираз, розташований у квадратних дужках, описує комплексний опір еквівалентної колу (рисунок 1.3) котушки індуктивності з активним опором $R_{екв} = R_1 + R_2$ та індуктивністю $L_{екв\ узаг} = L_1 + L_2 + 2M$ (рисунок 1.4).

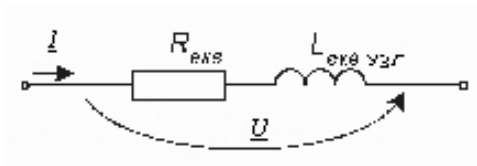


Рисунок 1.4

Тепер розглянемо випадок, в якому дві котушки з'єднані послідовно і при цьому **зустрічно**. Наявність активних опорів проводів, якими намотано ці котушки, врахуємо резисторами R_1 та R_2 . Відповідну схему наведено на рисунку 1.5.

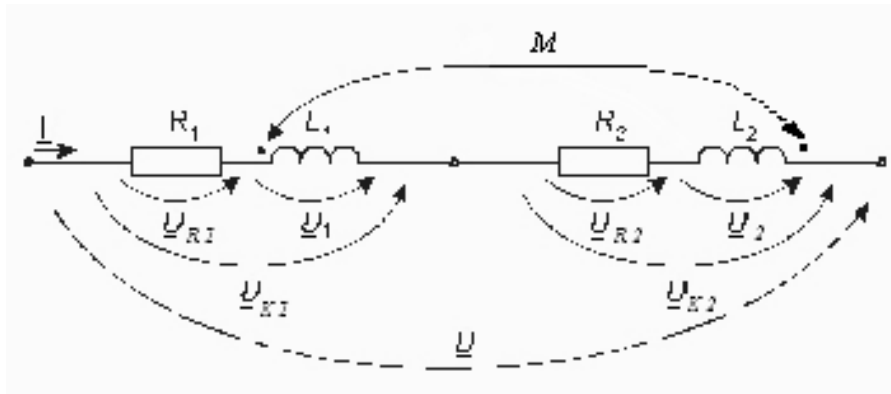


Рисунок 1.5

За другим законом Кірхгофа, загальна напруга \underline{U} дорівнює алгебраїчній сумі напруг на всіх елементах ділянки кола, при цьому слід урахувати, що напруги взаємної індукції при зустрічному з'єднанні є **від'ємними**:

$$\begin{aligned} \underline{U} &= \underline{U}_{R1} + \underline{U}_1 + \underline{U}_{R2} + \underline{U}_2 = \underline{I} R_1 + \underline{I} \cdot j\omega L_1 - \underline{I} \cdot j\omega M + \underline{I} R_2 + \underline{I} j\omega L_2 - \\ &- \underline{I} j\omega M = \underline{I} \cdot [R_1 + R_2 + j\omega(L_1 + L_2 - 2M)] \end{aligned} \quad (1.20)$$

Вираз, розташований у квадратних дужках, описує комплексний опір еквівалентної колу (рисунок 1.5) котушки індуктивності з активним опором $R_{екв} = R_1 + R_2$ та індуктивністю $L_{екв\ зустр} = L_1 + L_2 - 2M$ (рисунок 1.6).

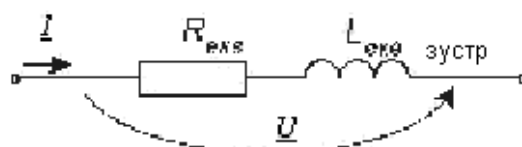


Рисунок 1.6

Отже, величина активного опору еквівалентної котушки однакова при обох видах з'єднання, а ось величина еквівалентної індуктивності є різною.

Якщо дві індуктивно зв'язані котушки розташовані в різних вітках кола, але ці вітки мають спільний вузол, то для спрощення розрахунку можна перетворити схему приєднаної до вказаного вузла ділянки кола так, щоб ліквідувати індуктивний зв'язок і при цьому зберегти в недоторканості струми та напруги в колі. Можливі дві ситуації:

- 1) котушки обернені до спільного вузла однойменними затискачами;
- 2) котушки обернені до спільного вузла різнойменними затискачами.

Першій ситуації відповідає схема, зображена на рисунку 1.7.

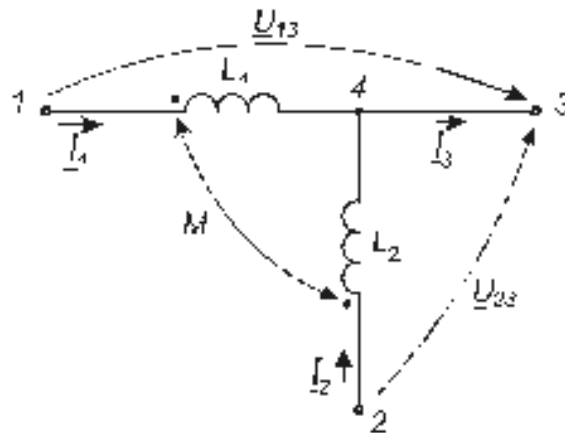


Рисунок 1.7

Можна довести, що зовнішні відносно цієї ділянки напруги (наприклад, U_{13} та U_{23}) і струми (це I_1 , I_2 , I_3) залишаться тими ж самими, якщо її замінити на ділянку, схему якої наведено на рисунку 1.8.

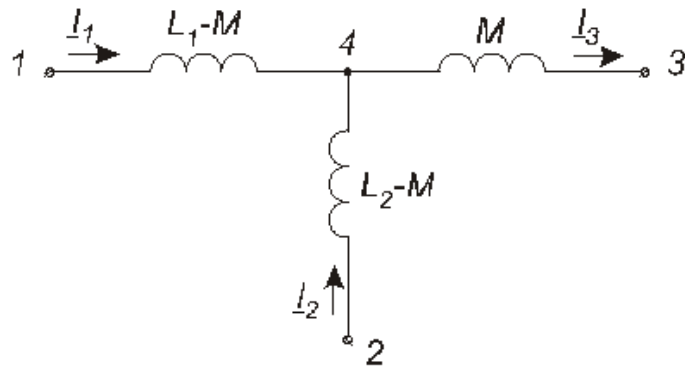


Рисунок 1.8

Другій ситуації відповідає схема, наведена на рисунку 1.9.

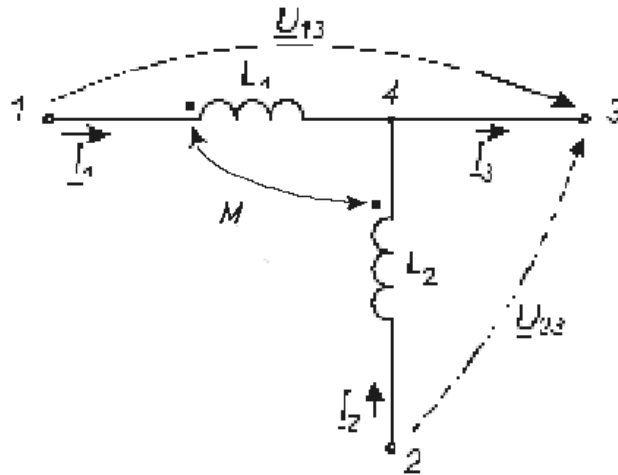


Рисунок 1.9

Можна довести, що напруги, зовнішні відносно цієї ділянки (наприклад, \underline{U}_{13} та \underline{U}_{23}) і зовнішні струми (це \underline{I}_1 , \underline{I}_2 , \underline{I}_3) залишаться тими ж самими, якщо її замінити на ділянку, схему якої наведено на рисунку 1.10. Від'ємна індуктивність величиною ($-M$) не є позбавленою фізичного сенсу помилкою, бо описане перетворення кола – лише проміжний крок розрахунку. Окремо відмітимо, що за певних обмежень технічна можливість реалізувати від'ємну індуктивність існує.

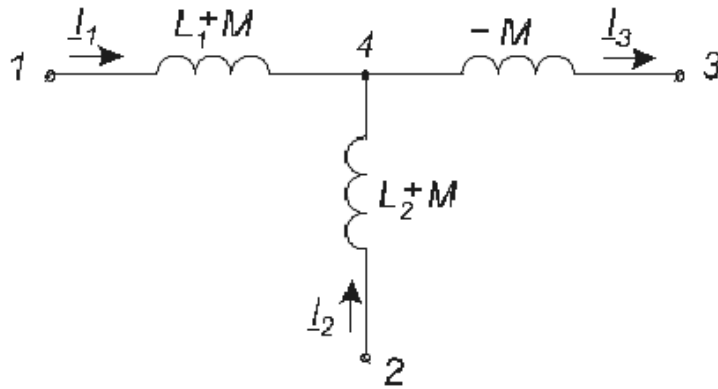


Рисунок 1.10

Комплексну потужність \underline{S} , яка виділяється в котушці L_1 , індуктивно зв'язаній з котушкою L_2 , обчислюють за відомою формулою

$$\underline{S} = \underline{U}_1 \cdot \underline{I}_1^* \quad (1.21)$$

Тут \underline{U}_1 – напруга на котушці L_1 , обчислена за формулою (1.16), а запис \underline{I}_1^* означає величину, комплексно спряжену струму \underline{I}_1 . Результат обчислення комплексної потужності дає змогу зробити висновок про те, в якому напрямку передається енергія. Для цього слід записати обчислену комплексну величину \underline{S} в алгебраїчній формі як $\underline{S} = P + j \cdot Q$. Якщо активна потужність P виявиться додатним числом, то котушка L_1 передає цю потужність в котушку L_2 , в колі якої й відбувається безповоротне споживання енергії. Якщо ж числова величина P виявиться від'ємною, то все навпаки – котушка L_1 є отримувачем енергії, яка надходить від котушки L_2 .

2 РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА

2.1 Вихідні дані для розрахунку

Запропоновані для розрахунку варіанти схеми кола наведені на рисунку 2.1. Варіанти величин параметрів елементів цих схем наведені в таблиці 2.1. Номери варіантів задає викладач – керівник навчальних занять.

2.2 Зміст завдання

2.2.1 Обчислити комплекси діючих значень струмів в усіх вітках кола. **Коефіцієнт зв'язку** між котушками прийняти рівним **0,85**. Наявність ватметра не враховувати. Для виконання розрахунку можна обрати найбільш зручний для себе метод.

2.2.2 Обчислити комплексну, повну, активну та реактивну потужності, що розвиваються як кожним з джерел, так і сумарно обома джерелами. Обчислити також потужності, спожиті кожним з елементів кола. Перевірити баланс потужностей.

2.2.3 Побудувати замкнену векторну діаграму струмів будь-якого одного з вузлів кола (точки підключення ватметра не враховувати).

2.2.4 Обчислити комплекси діючих значень напруг всіх віток та комплекси діючих значень напруг на всіх елементах кола.

2.2.5 Побудувати замкнені векторні діаграми напруг будь-яких двох незалежних контурів кола.

2.2.6 Записати миттєві значення всіх струмів, а також напруг кожної з віток кола.

Рекомендації та поради щодо розрахунків кіл з індуктивно зв'язаними елементами можна знайти також у підручниках [3, 4].

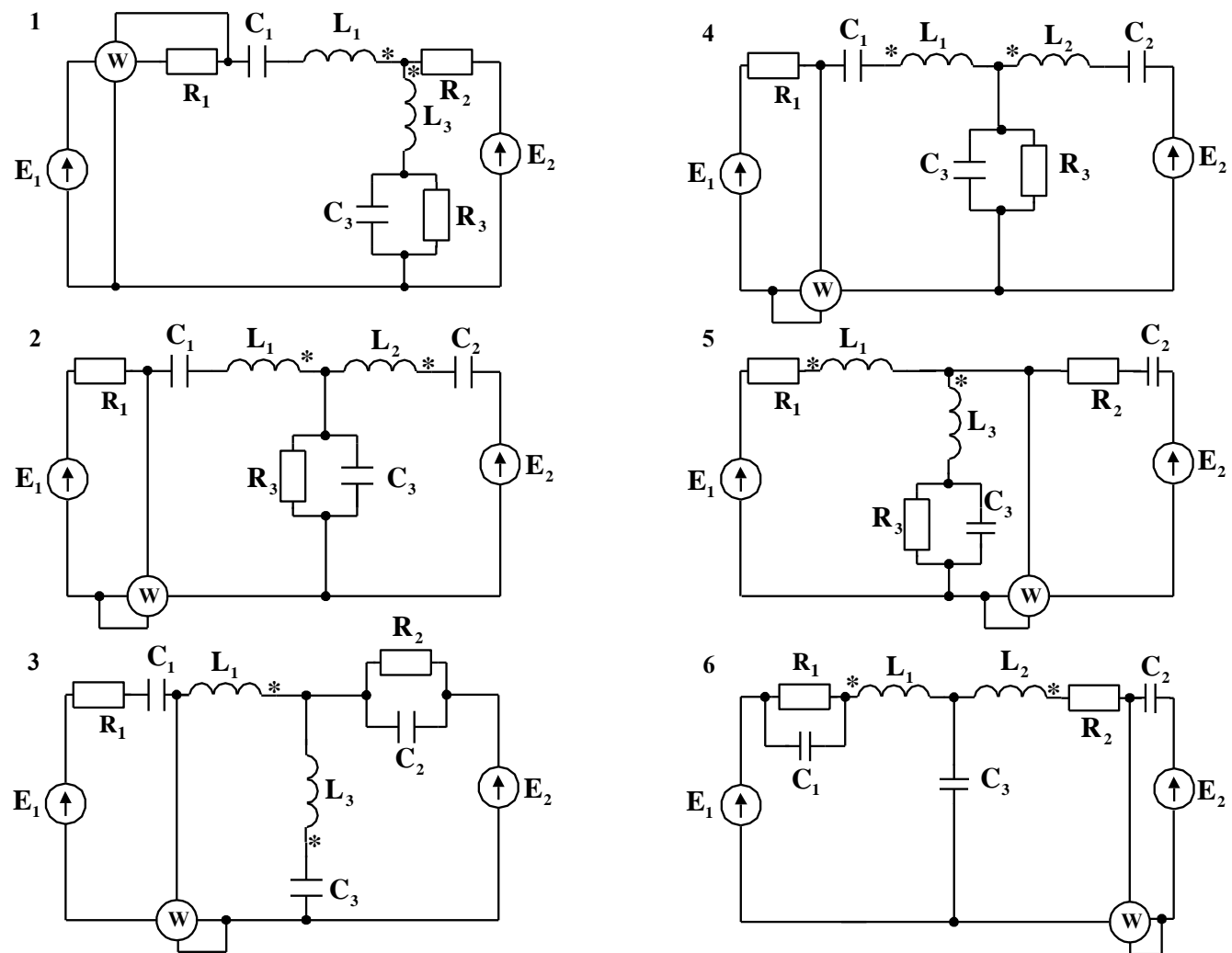


Рисунок 2.1

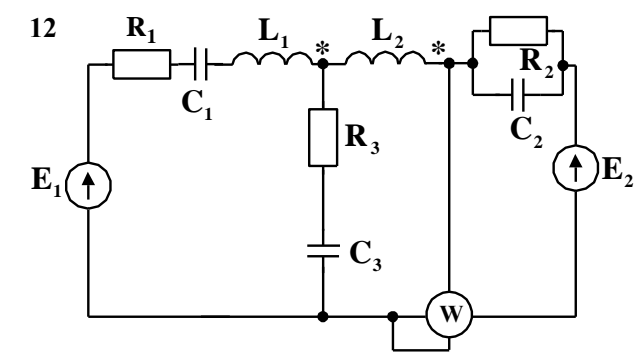
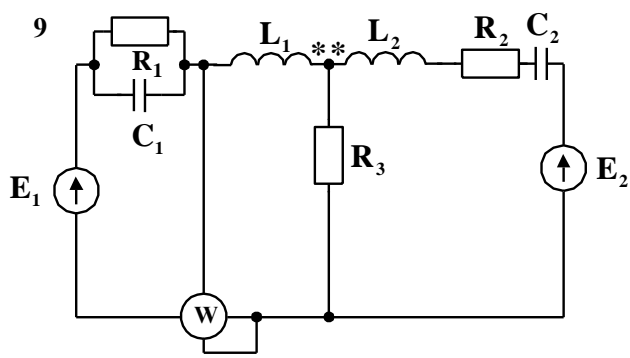
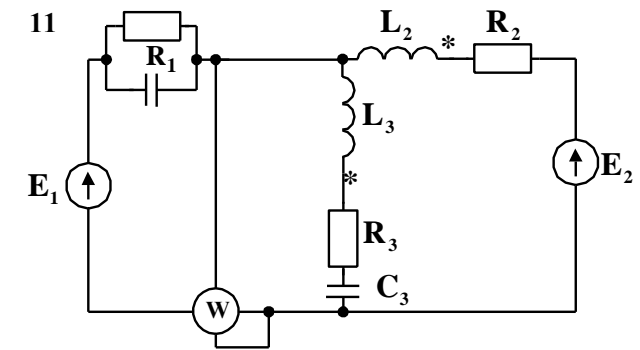
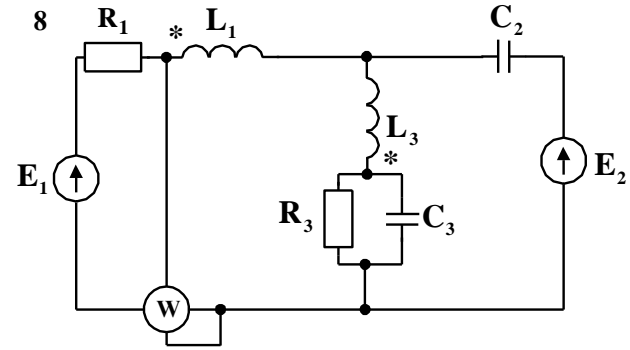
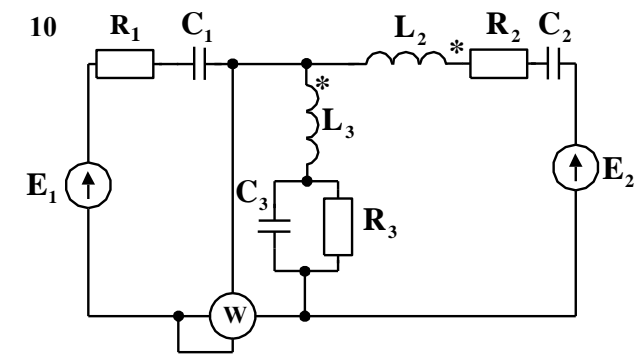
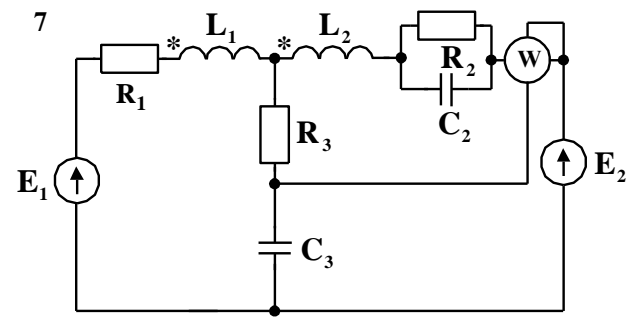


Рисунок 2.1 Продовження

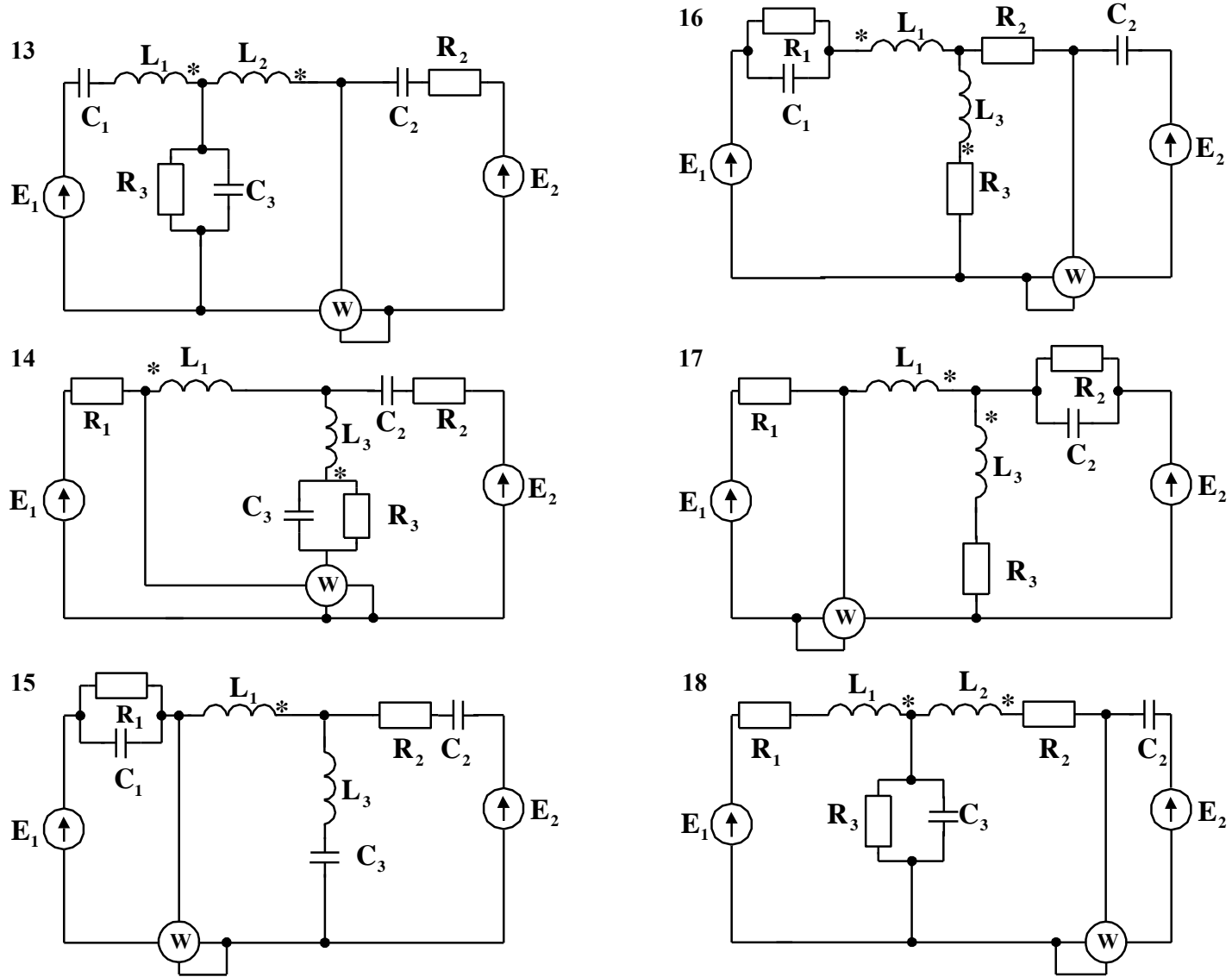


Рисунок 2.1 Продовження

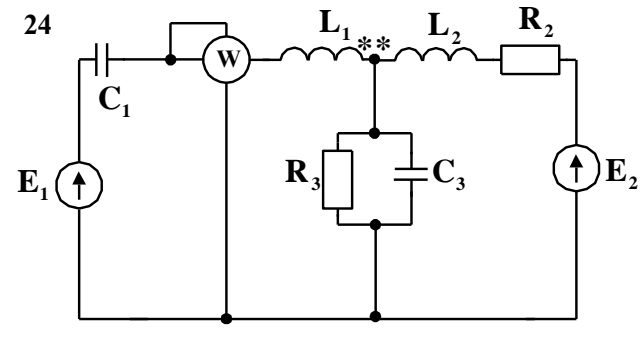
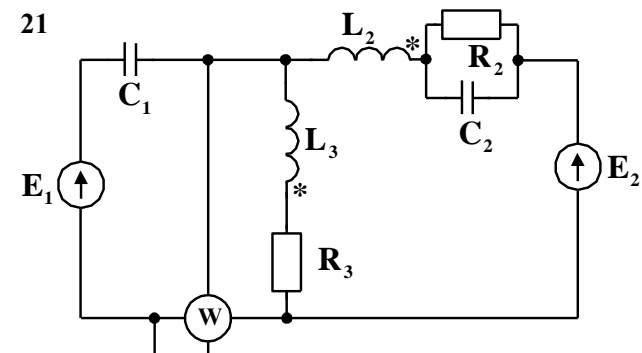
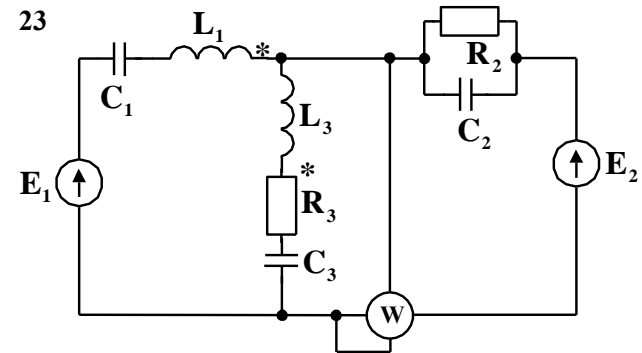
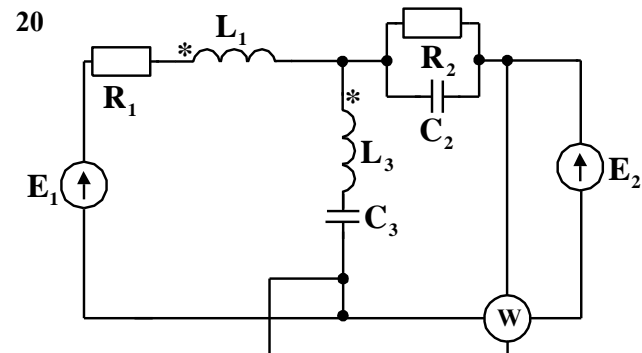
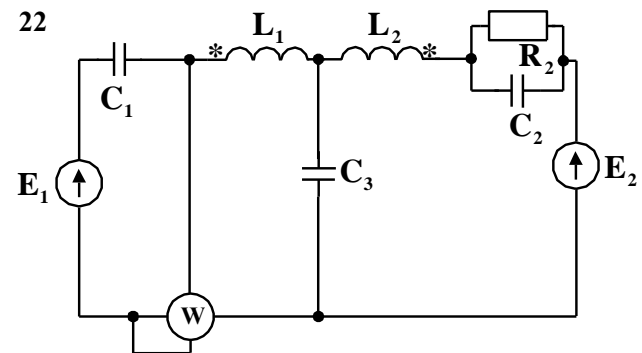
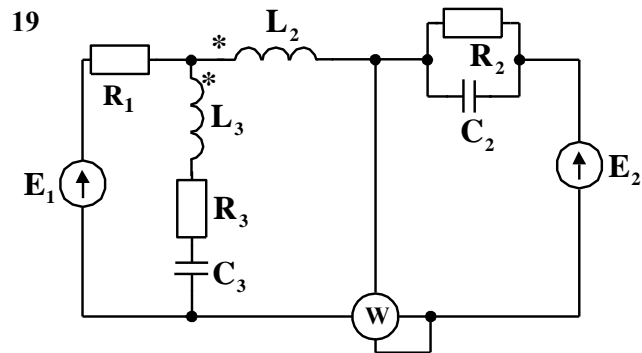


Рисунок 2.1 Продовження

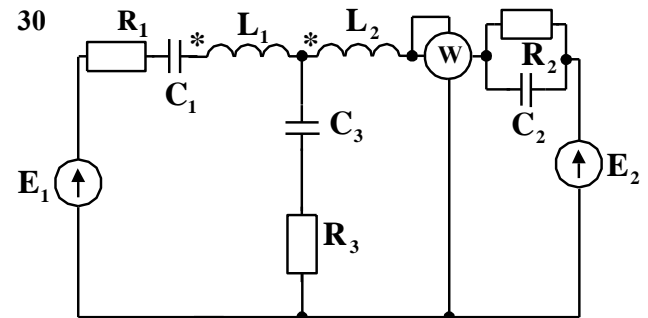
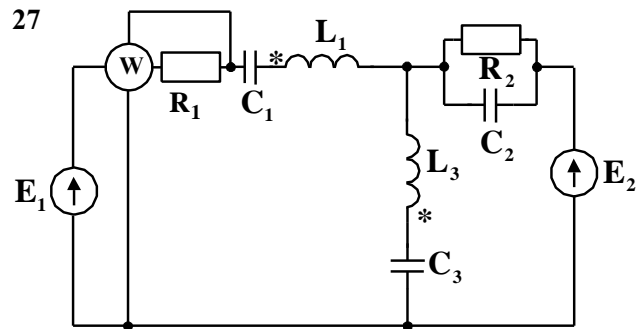
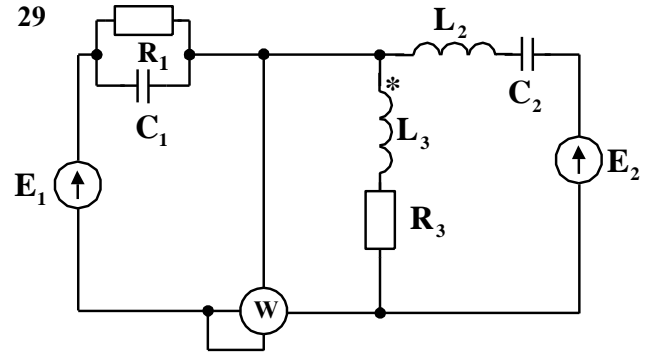
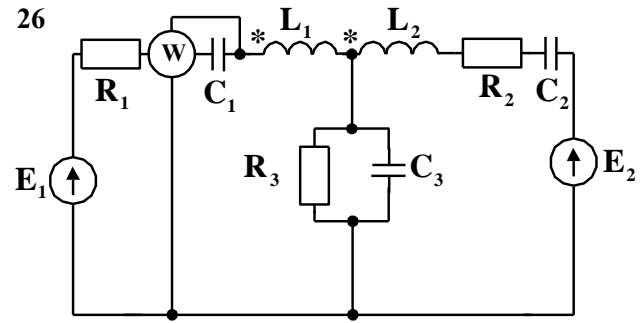
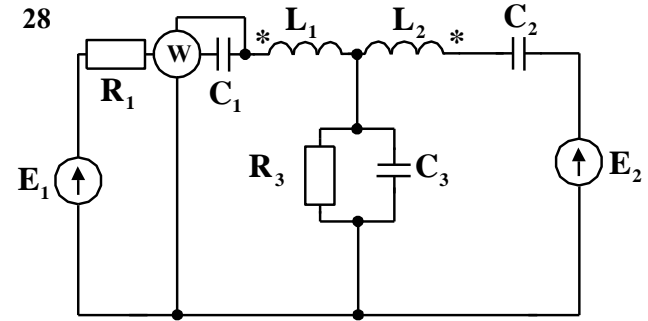
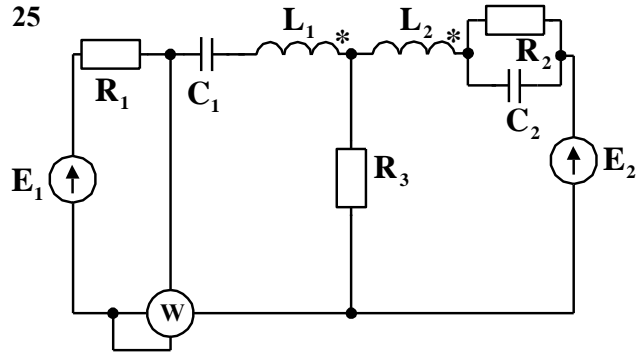


Рисунок 2.1 Продовження

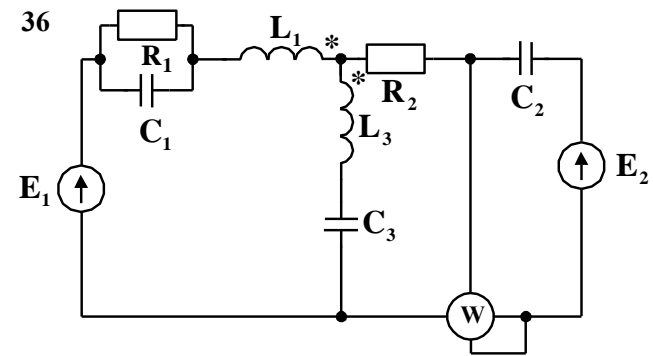
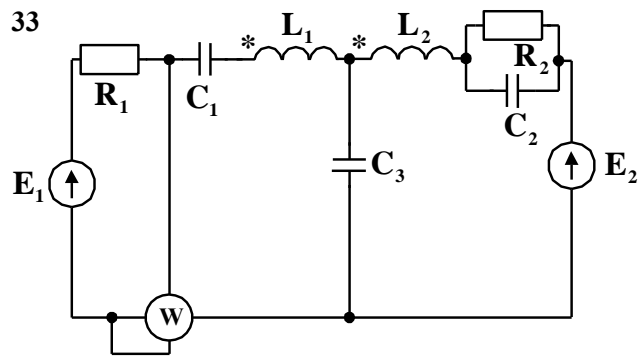
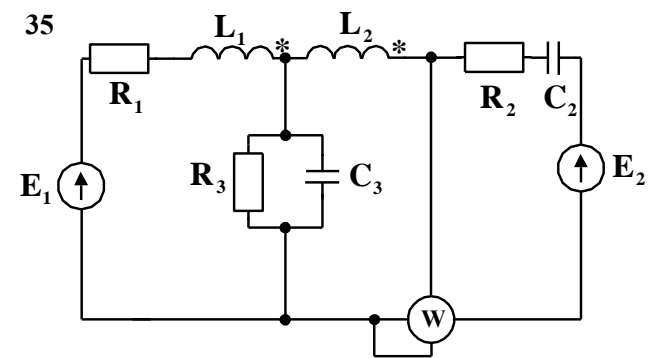
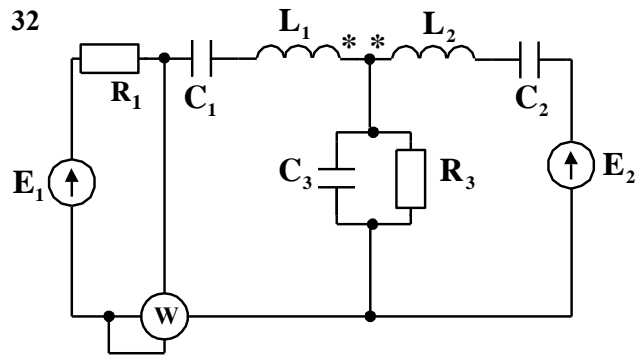
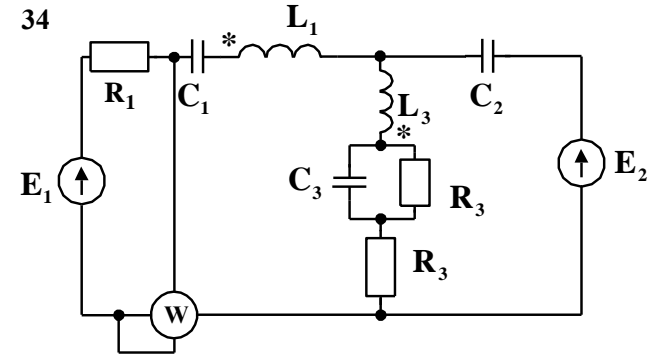
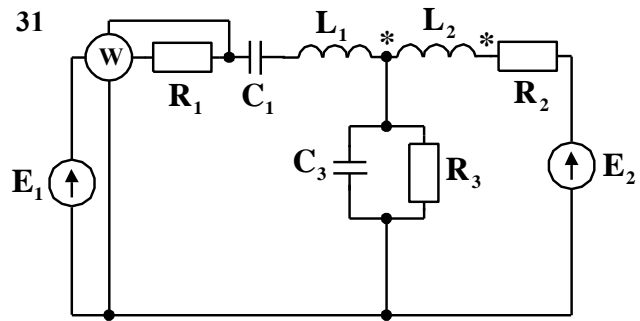


Рисунок 2.1 Продовження

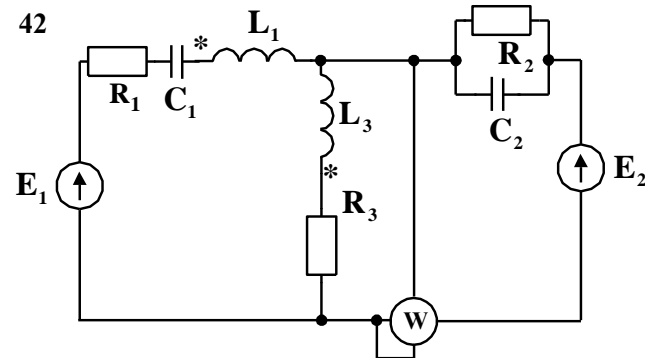
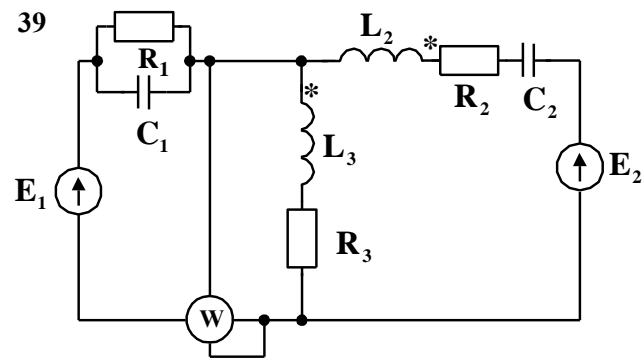
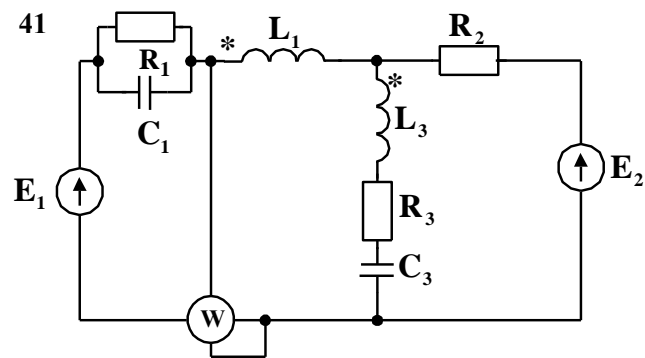
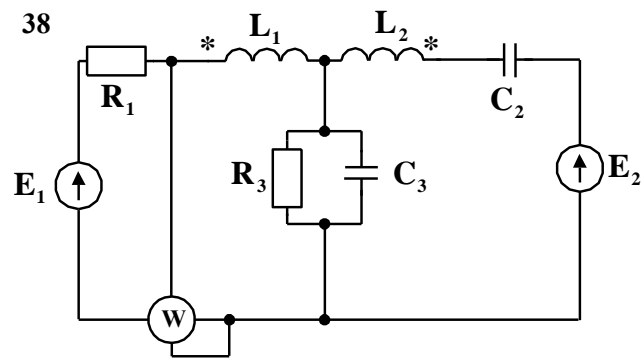
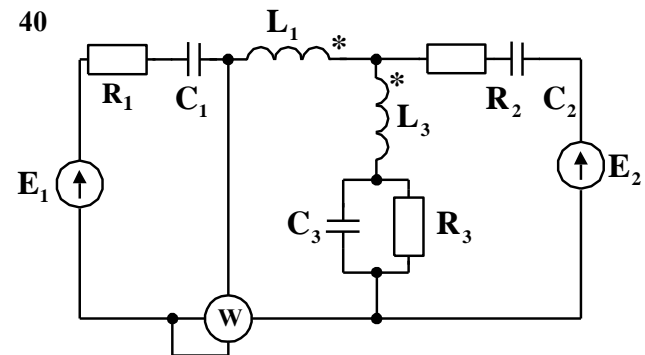
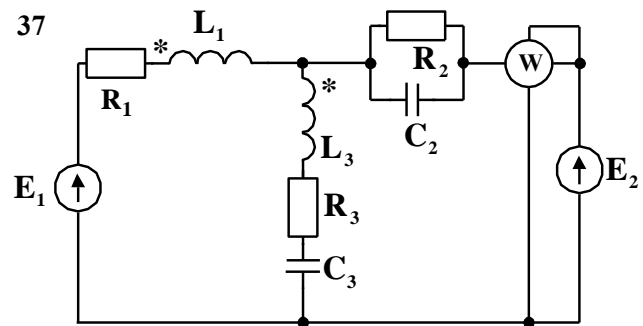


Рисунок 2.1 Продовження

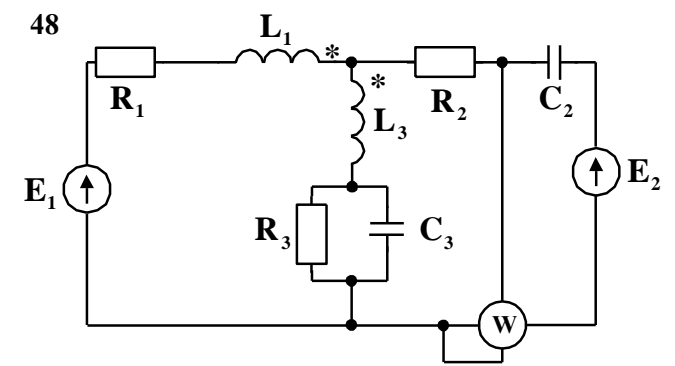
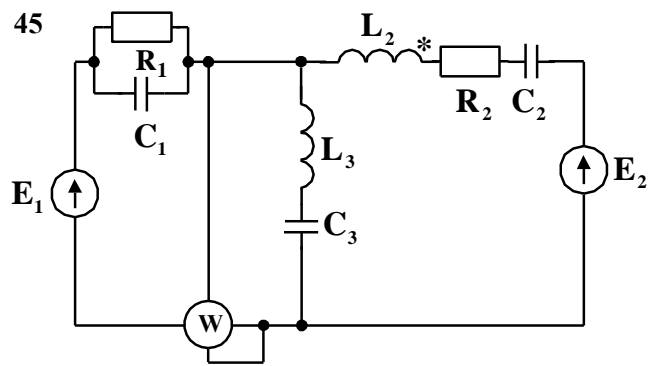
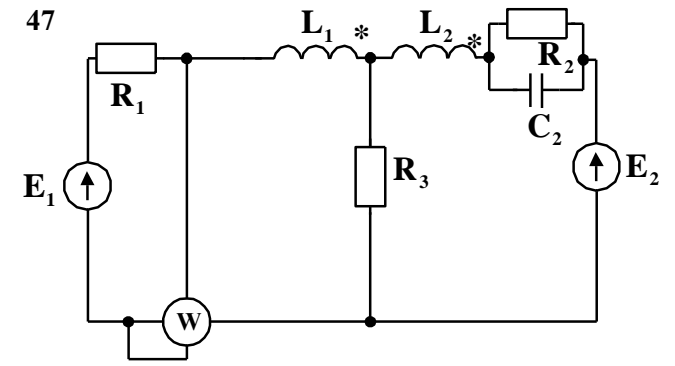
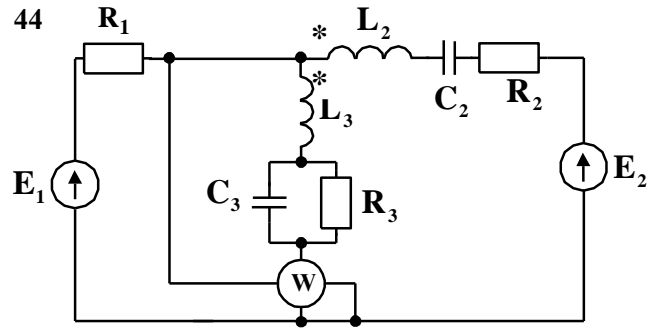
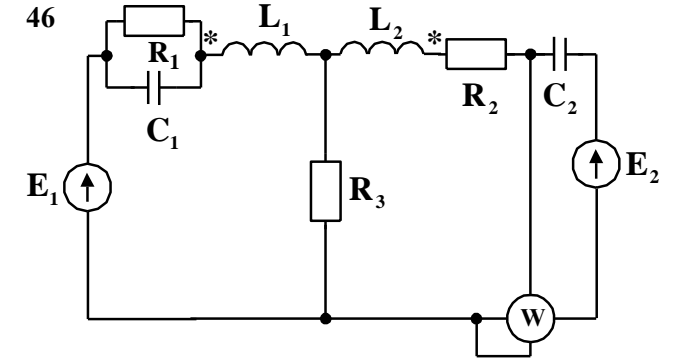
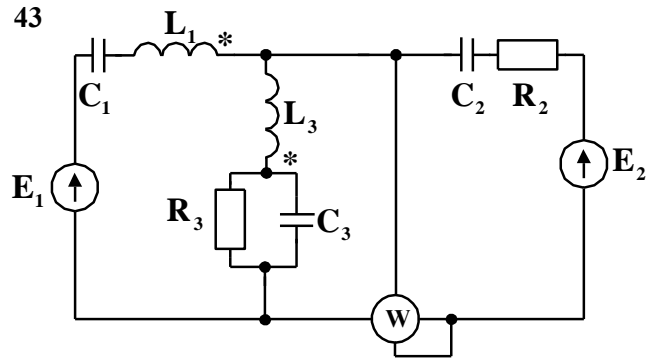


Рисунок 2.1 Продовження

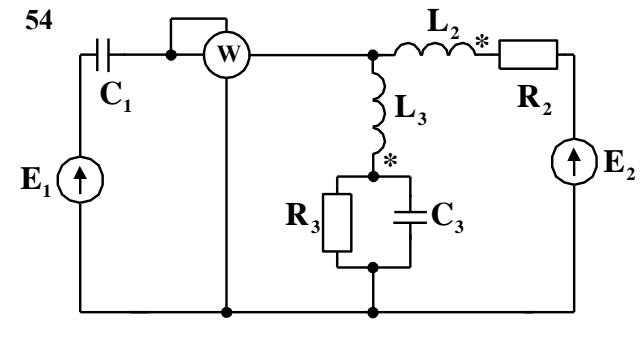
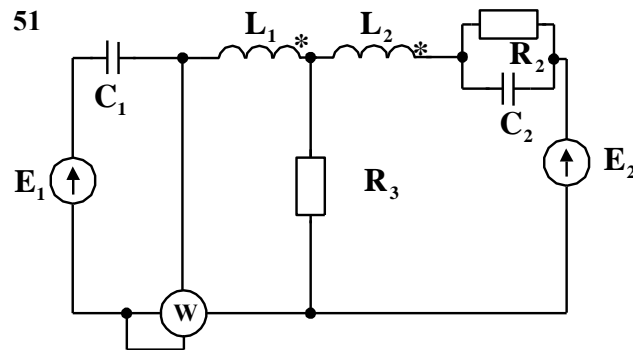
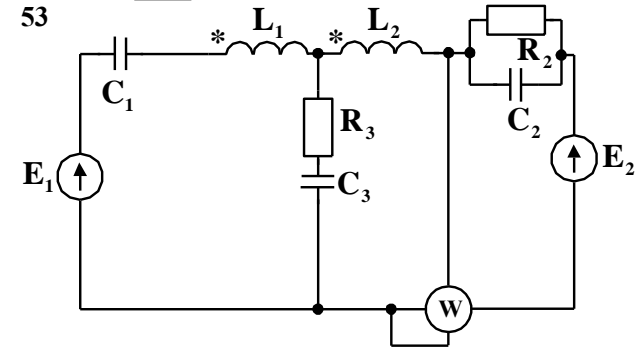
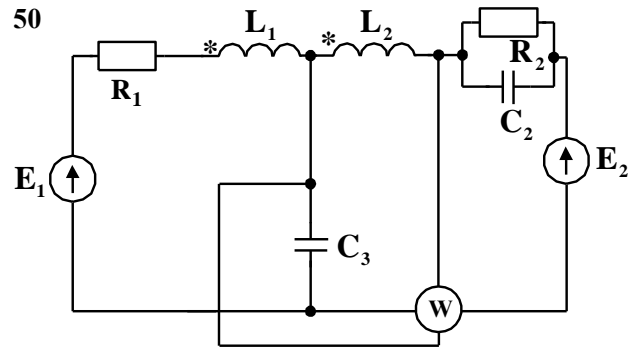
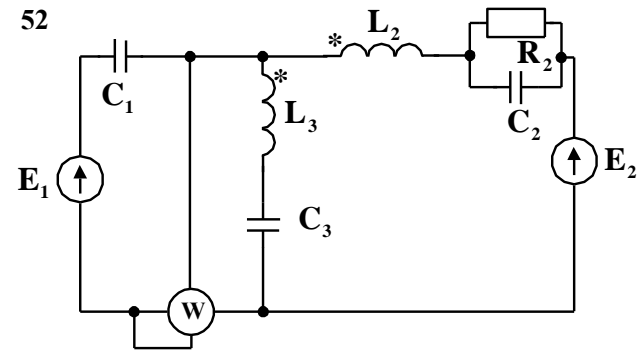
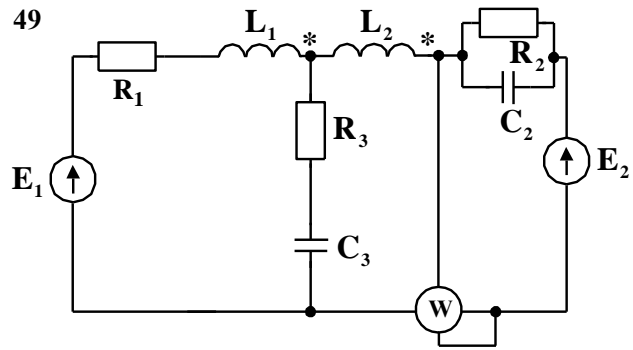


Рисунок 2.1 Продовження

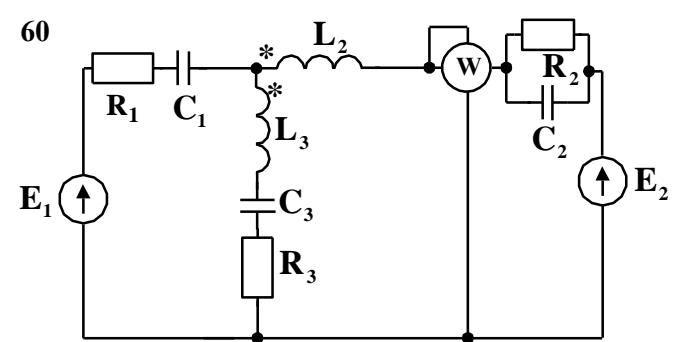
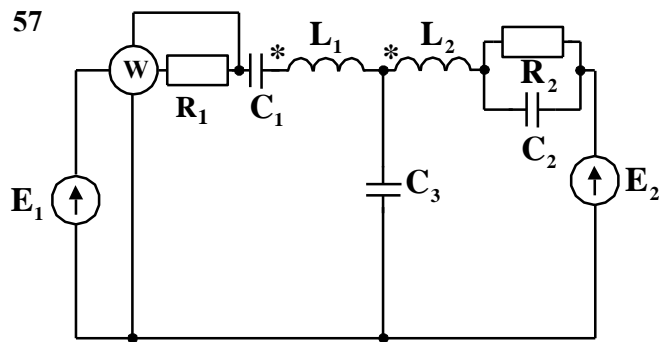
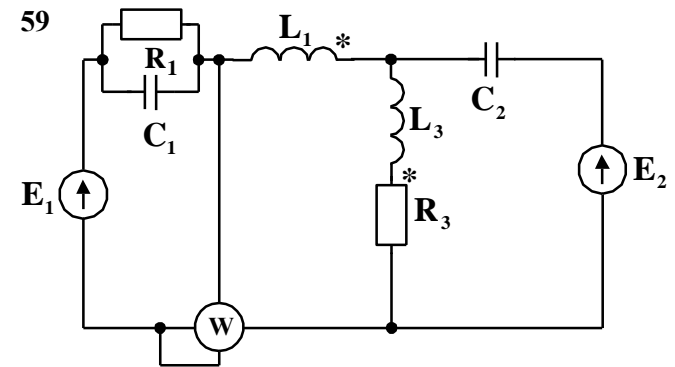
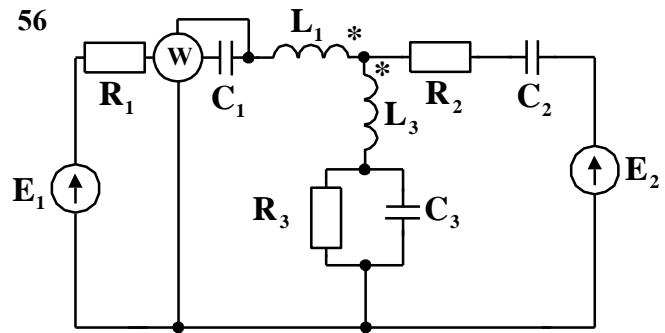
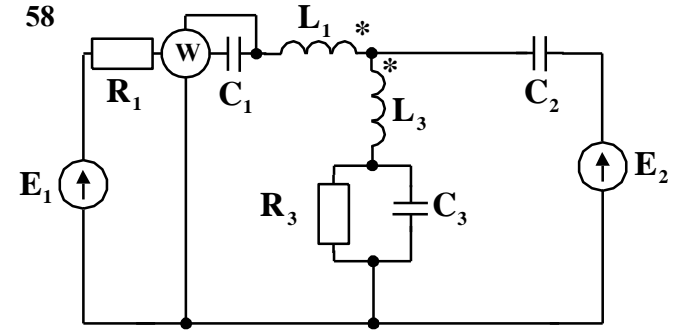
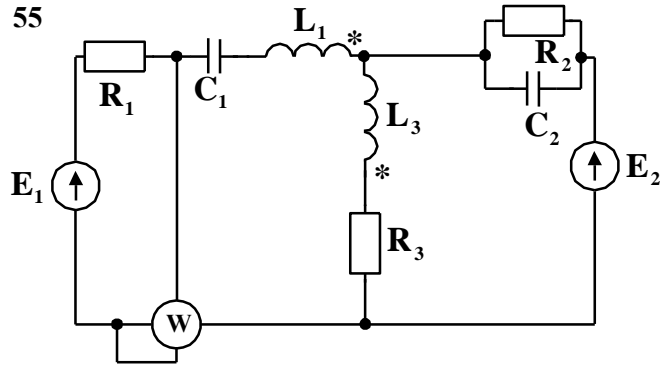


Рисунок 2.1 Продолжения

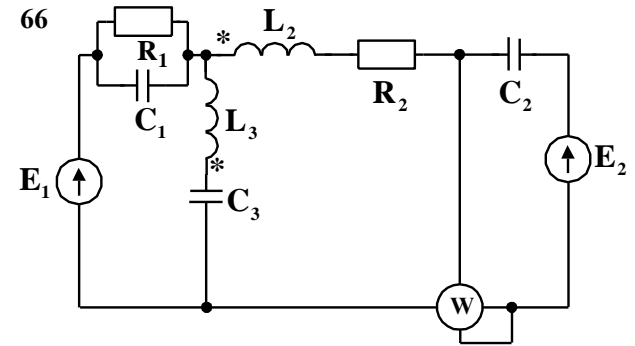
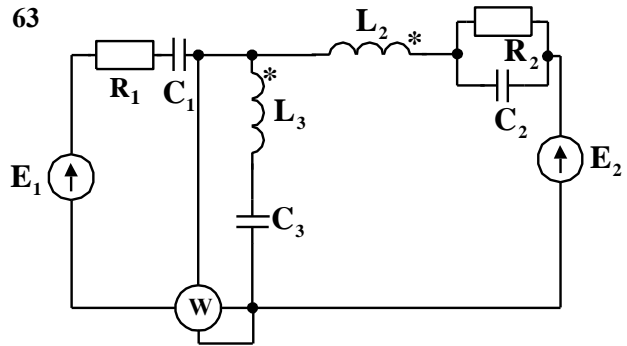
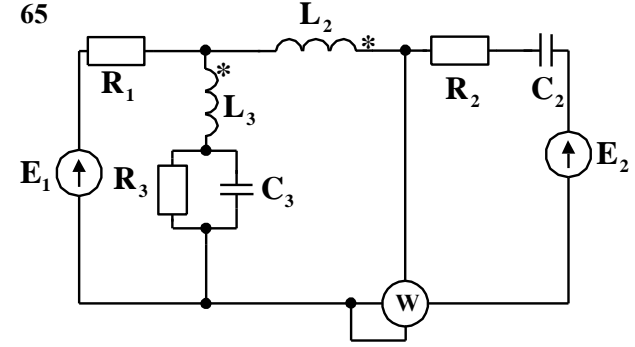
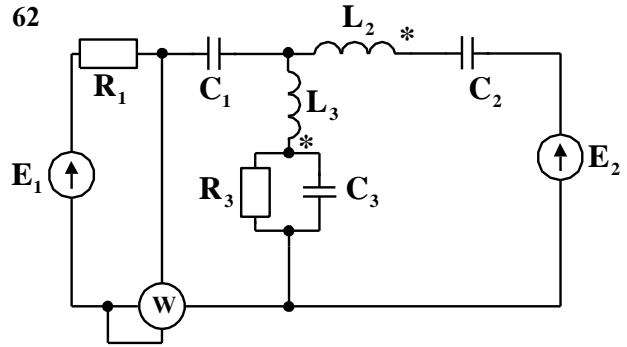
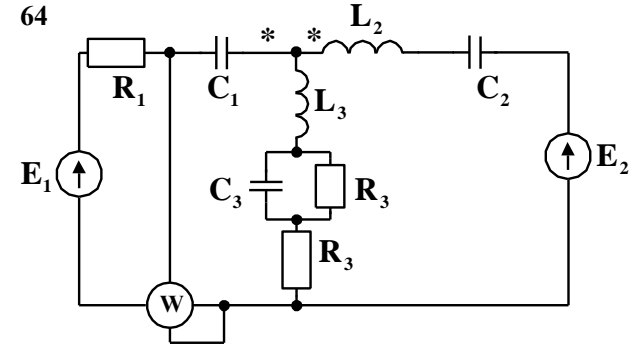
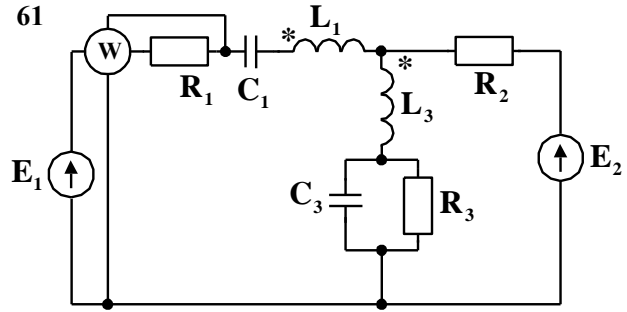


Рисунок 2.1 Продовження

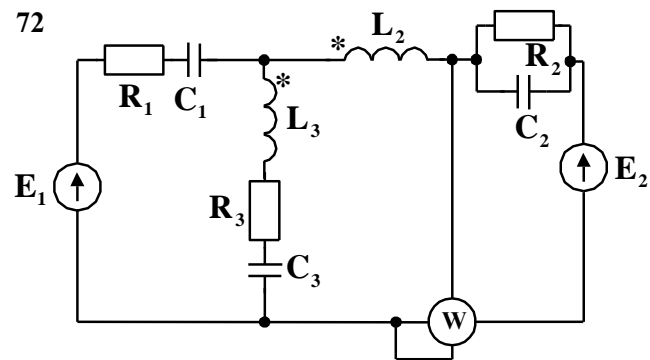
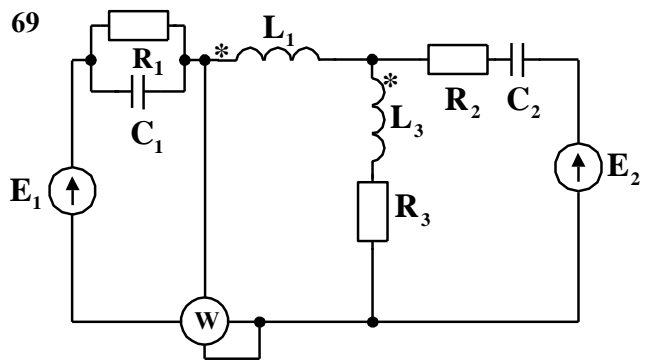
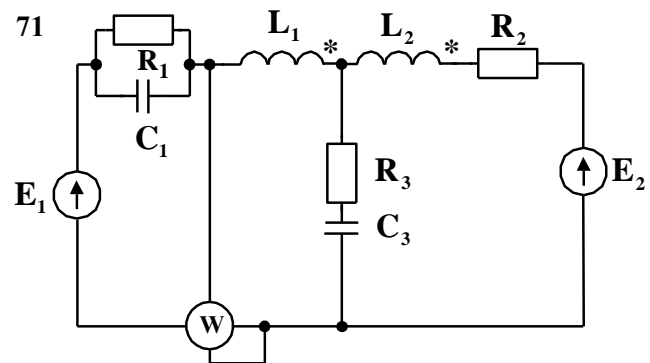
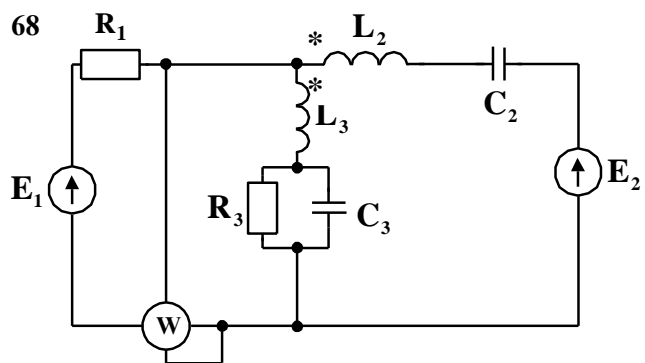
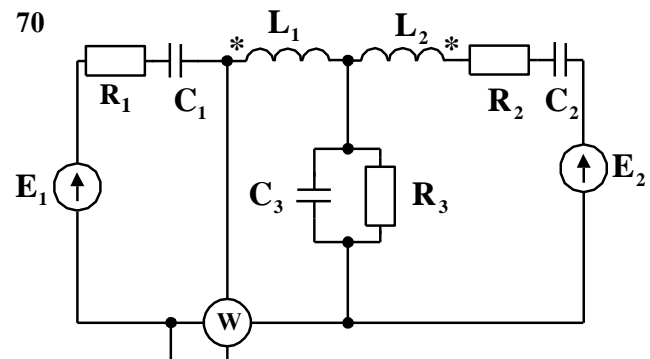
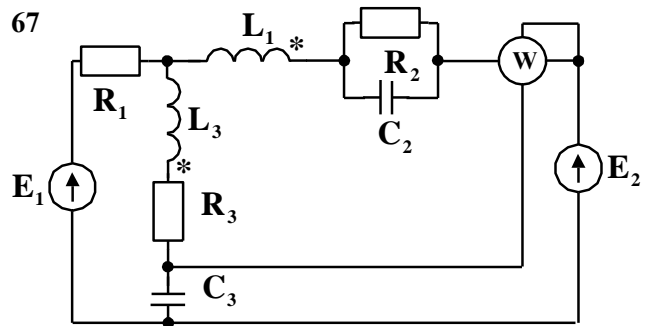


Рисунок 2.1 Продовження

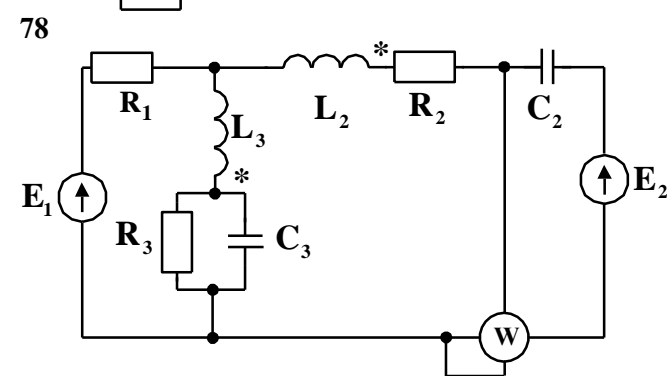
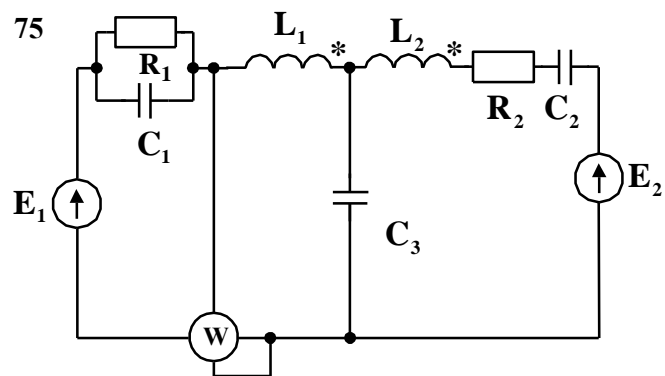
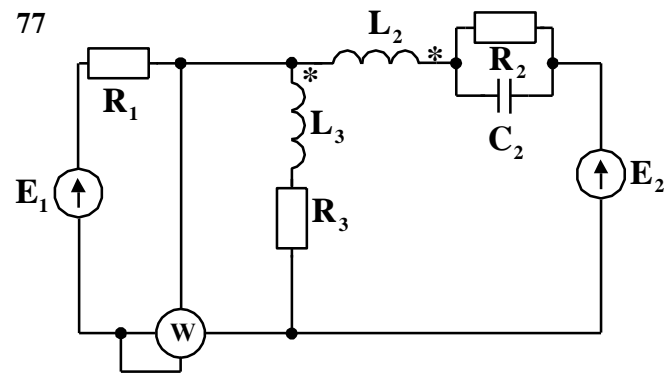
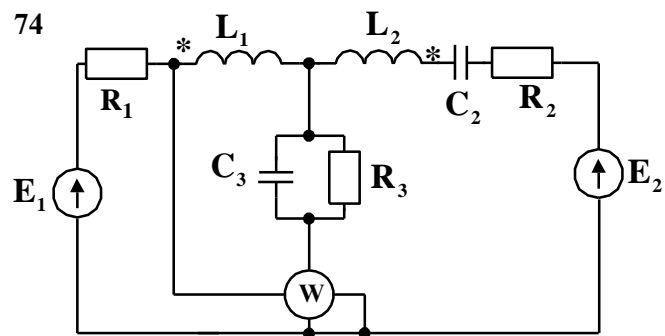
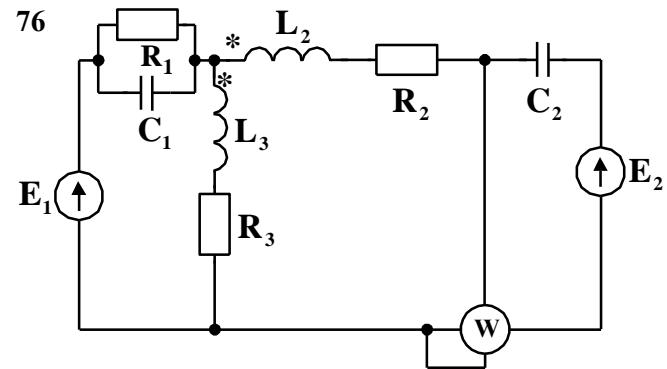
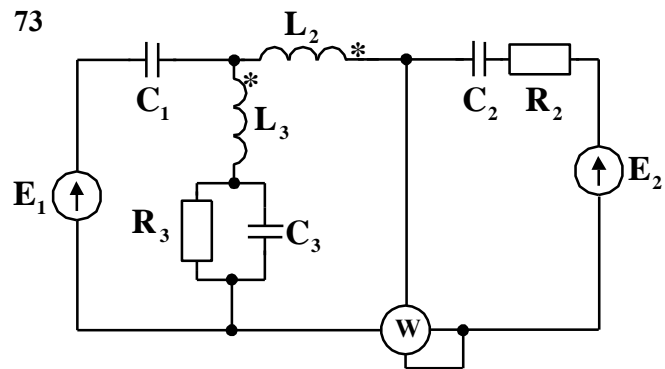


Рисунок 2.1 Продовження

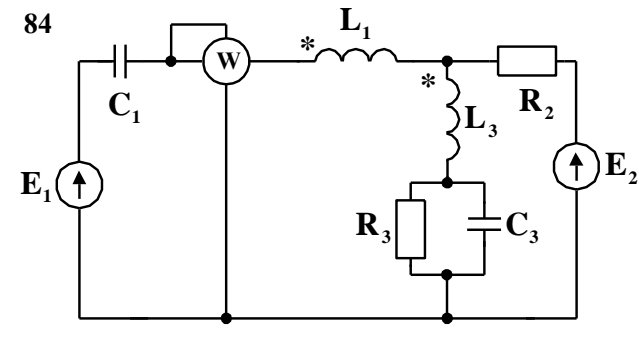
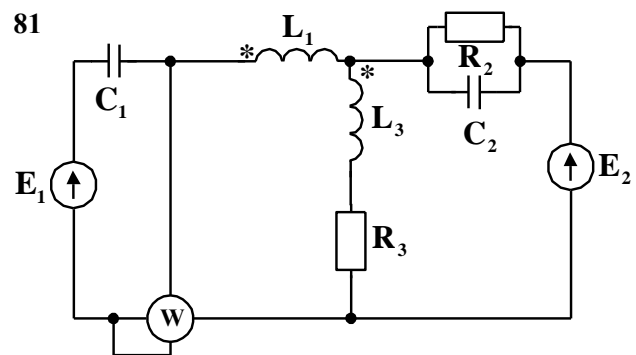
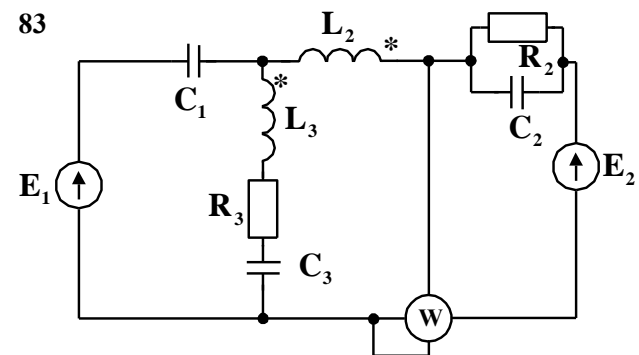
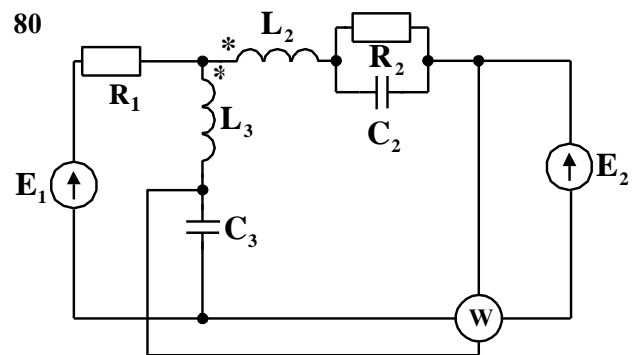
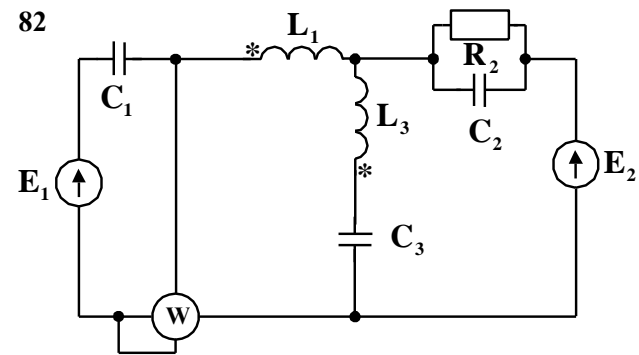
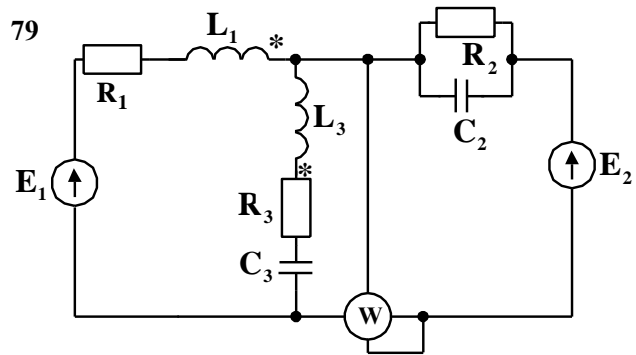


Рисунок 2.1 Продовження

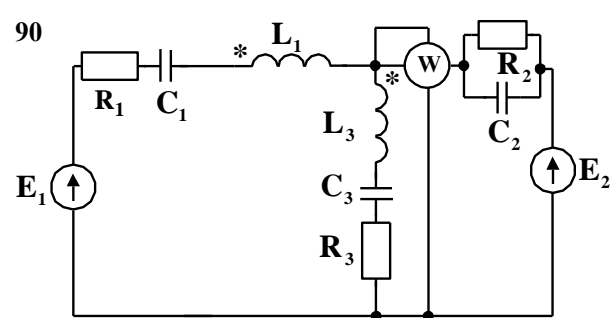
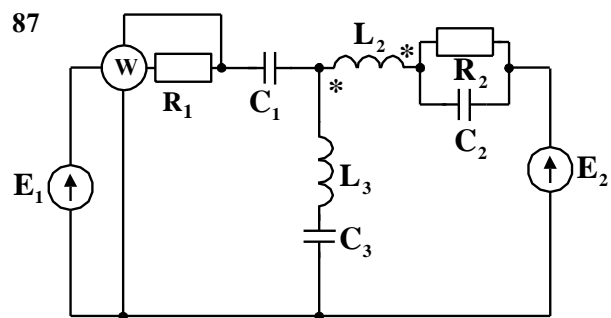
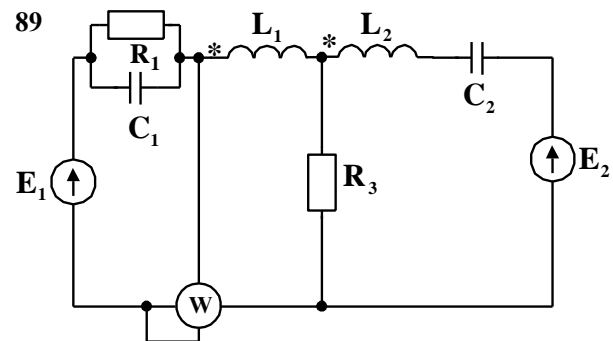
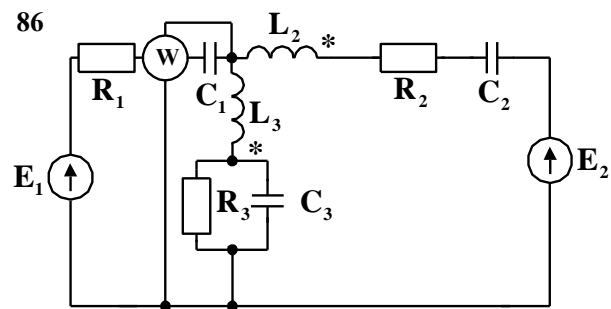
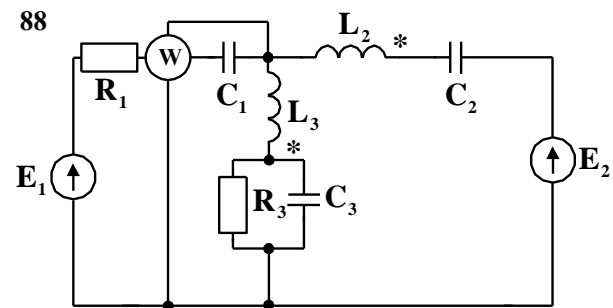
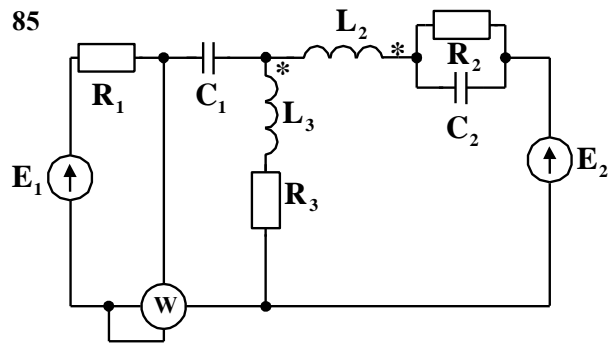


Рисунок 2.1 Продолжения

Таблиця 2.1 – Варіанти вихідних даних

Номер схеми	Остання цифра номеру варіанта	Діюче значення	Початкова фаза	Діюче значення	Початкова фаза	R_1 , Ом	R_2 , Ом	R_3 , Ом	L_1 , мГн	L_2 , мГн	L_3 , мГн	C_1 , мкФ	C_2 , мкФ	C_3 , мкФ	f , кГц
		E_1 , В	φ_1 , градус	E_2 , В	φ_2 , градус										
Дорівнює номеру варіанта, заданому викладачем	0	2	20	4	30	5	10	15	3	5	8	0,1	0,2	0,1	5
	1	3	40	5	90	10	20	20	5	7	10	0,2	0,1	0,3	8
	2	4	60	6	160	5	2	5	7	10	2	0,6	0,2	0,7	2
	3	5	80	8	140	4	8	8	9	12	6	0,5	0,5	0,2	3
	4	6	100	9	120	80	40	50	20	8	20	0,4	0,9	0,4	3
	5	7	120	10	100	20	10	60	8	20	8	0,3	0,15	0,4	7
	6	11	140	7	80	3	3	9	4	4	9	0,4	0,3	0,15	6
	7	13	160	5	60	7	10	20	9	9	4	0,2	0,1	0,2	9
	8	14	90	6	40	22	12	6	3	8	10	0,7	0,4	0,6	2
	9	16	30	7	20	90	40	90	5	20	10	0,2	0,3	0,1	5

3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

3.1 Мета роботи

Метою проведення експериментів є дослідження кола, утвореного послідовним з'єднанням індуктивно зв'язаних котушок, а також експериментальне визначення числових величин параметрів трансформатора без феромагнітного осердя.

3.2 Опис вимірювальної установки

Дослідження зручно проводити на вимірювальній установці, що складена за схемою, наведеною на рисунку 3.1, *а*. До лівої пари затискачів підмикають джерело синусоїдної напруги. До затискачів *а-б* цієї установки підмикають досліджувані котушки або нарізно, або з'єднані послідовно (рисунок 3.1, *б*). Зірочки при котушках позначають їх однойменні затискачі. В останньому експерименті використовують трансформатор, утворений з цих котушок так, як це показано на рисунку 3.2.

3.3 Завдання на експеримент

3.3.1 Скласти вимірювальну установку згідно зі схемою, наведеною на рисунку 3.1, *а*.

3.3.2 Підімкнути до затискачів *а-б* котушку 1 (рисунок 3.1, *б*). Звертаємо увагу на те, що **при експерименті на реальній вимірювальній установці опір $R_{к1}$** – це опір проводу, яким намотано котушку, а не опір окремого резистора! (А ось **при комп'ютерному моделюванні** цей резистор треба буде встановити в коло). Перевірити зібране коло разом із викладачем. Встановити вхідну напругу 25-35 В. Дати котушці прогрітися

протягом трьох хвилин (**при експерименті на реальній вимірювальній установці**). Виміряти величини напруги, струму та потужності, записати їх до рядка 1 таблиці 3.1. Вимкнути джерело вхідної напруги.

3.3.3 Підімкнути до затискачів ***a-b*** котушку 2 (рисунок 3.1, *в*). Знов звертаємо увагу на те, що **при експерименті на реальній вимірювальній установці** опір R_{K2} – це опір проводу, яким намотано котушку, а не опір окремого резистора! (А ось **при комп'ютерному моделюванні** цей резистор треба буде встановити в коло). Перевірити зібране коло разом із викладачем. Встановити вхідну напругу 25-35 В. Дати котушці прогрітися протягом трьох хвилин (**при експерименті на реальній вимірювальній установці**). Виміряти величини напруги, струму та потужності, записати їх до рядка 1 таблиці 3.1. Вимкнути джерело вхідної напруги.

3.3.4 З'єднати котушки 1 і 2 послідовно і узгоджено (рисунок 3.1, *г*, у котушки L_{K2} **зірочка справа**). Щодо необхідності ввімкнення резисторів R_{K1} і R_{K2} зауваження ті ж самі, що й при попередньому дослідженні окремо взятих котушок. Підімкнути це коло до затискачів ***a-b*** вимірювальної установки. Перевірити зібране коло разом із викладачем. Установити вхідну напругу 30-35 В. Дати колу прогрітися протягом трьох хвилин (**при експерименті на реальній вимірювальній установці**). Виміряти величини напруги, струму та потужності, записати їх до першого рядка таблиці 3.2. Вимкнути джерело вхідної напруги.

3.3.5 З'єднати котушки 1 та 2 послідовно і зустрічно (рисунок 3.1, *г*, у котушки L_{K2} **зірочка зліва**). Щодо необхідності вмикання резисторів R_{K1} і R_{K2} зауваження ті ж самі, що й при попередньому дослідженні окремо взятих котушок. Підімкнути це коло до затискачів ***a-b*** вимірювальної установки. Перевірити зібране коло разом із викладачем. Встановити вхідну напругу 30-35 В. Дати колу прогрітися протягом трьох хвилин (**при експерименті на реальній вимірювальній установці**). Виміряти

величини напруги, струму та потужності, записати їх до другого рядка таблиці 3.2. Вимкнути джерело вхідної напруги.

3.3.6 Скласти з індуктивно зв'язаних котушок трансформатор (рисунок 3.2). Щодо необхідності вмикання резисторів R_{K1} і R_{K2} зауваження ті ж самі, що й при попередньому дослідженні окремо взятих котушок. Підімкнути до затискачів *a-b* вимірювальної установки первинну обмотку трансформатора. До затискачів *c-d* нічого не підмикати, встановивши у такий спосіб для трансформатора **режим холостого ходу**. Перевірити зібране коло разом із викладачем. Установити вхідну напругу 30-35 В. Дати колу прогрітися протягом трьох хвилин (**при експерименті на реальній вимірювальній установці**). Виміряти величини напруг, струму та потужності, записати їх до верхнього рядка таблиці 3.3. Вимкнути джерело вхідної напруги.

3.3.7 Підімкнути до затискачів *c-d* трансформатора активний опір величиною 10 Ом, установивши у такий спосіб для трансформатора **режим роботи під навантаженням**. Щодо необхідності вмикання резисторів R_{K1} та R_{K2} зауваження ті ж самі, що й при попередньому дослідженні окремо взятих котушок. Перевірити зібране коло разом із викладачем. Установити вхідну напругу 30-35 В. Дати колу прогрітися протягом трьох хвилин (**при експерименті на реальній вимірювальній установці**). Виміряти величини напруг, струму та потужності, записати їх до нижнього рядка таблиці 3.3. Вимкнути джерело вхідної напруги.

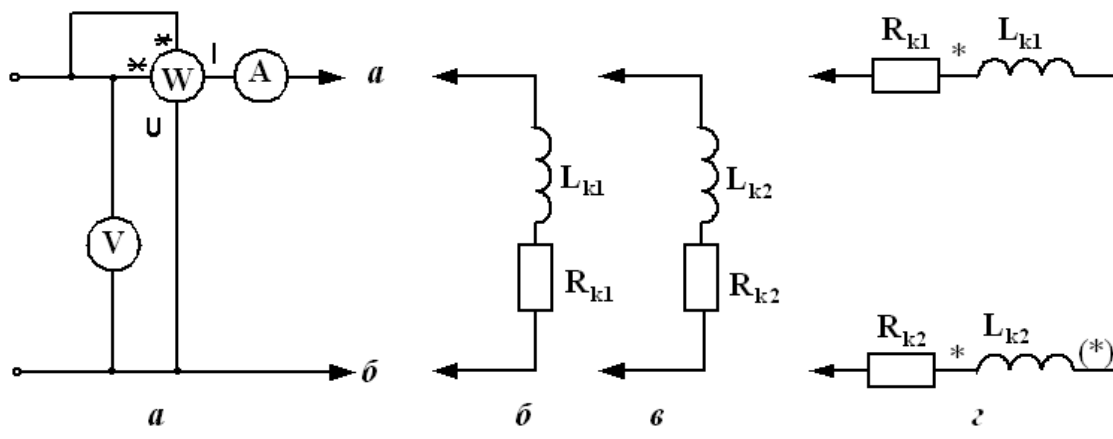


Рисунок 3.1

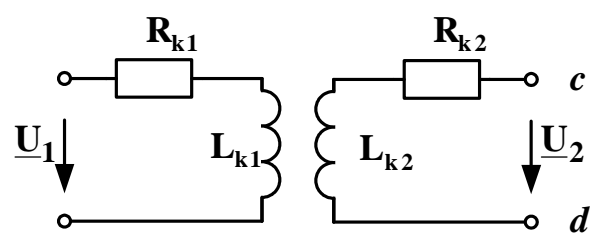


Рисунок 3.2

Таблиця 3.1

Номер котушки	Виміряно			Обчислено				
	U	I	P	Z	cos φ	r	x	L
	В	А	Вт	Ом	-	Ом	Ом	Гн
1								
2								

Таблиця 3.2

Характер з'єднання котушок	Виміряно			Обчислено						
	U	I	P	Z_{екв}	R_{екв}	X_{екв}	L_{екв}	M	K	φ
	В	А	Вт	Ом	Ом	Ом	Гн	Гн	-	градус
Послідовне узгоджене										
Послідовне зустрічне										

Таблиця 3.3

Режим роботи трансформатора	Виміряно				Обчислено	
	U_1	U_2	I_1	P_1	$\cos\varphi = \frac{P_1}{U_1 I_1}$	$M = \frac{U_2}{\omega I_1}$
	В	В	А	Вт		Гн
Холостий хід						
Робота на активне навантаження						--

3.4 Опрацювання результатів експерименту

3.4.1 За результатами вимірювань (пункти 3.3.2 та 3.3.3 робочого завдання) розрахувати активні, реактивні та повні опори котушок відповідно R , X та Z , а також індуктивності цих котушок.. Занести ці результати до таблиці 3.1.

3.4.2 За дослідними даними (пункти 3.3.4 та 3.3.5 робочого завдання) обчислити еквівалентний активний, реактивний та повний опір з'єднаних котушок, їхні еквівалентні індуктивності при узгодженому та зустрічному з'єднанні, взаємну індуктивність (див. примітку нижче) та коефіцієнт зв'язку. Занести ці результати до таблиці 3.2.

ПРИМІТКА

Взаємну індуктивність двох котушок розраховують одним з двох описаних нижче способів.

Спосіб 1. Обчислюють індуктивності L_{K1} та L_{K2} котушок. Як відомо, еквівалентні індуктивності $L_{екв\ узгодж}$ при узгодженому і $L_{екв\ зустр}$ при зустрічному вмиканні котушок є такими:

$$L_{екв\ узгодж} = L_{K1} + L_{K2} + 2M;$$

$$L_{екв\ зустр} = L_{K1} + L_{K2} - 2M.$$

Обчислюють $L_{екв\ узгодж} - L_{екв\ зустр} = 4M$. Звідси

$$M = \frac{L_{екв\ узгодж} - L_{екв\ зустр}}{4}.$$

Обчислюють коефіцієнт зв'язку котушок $K = \frac{M}{\sqrt{L_{K1}L_{K2}}}$.

Спосіб 2. Проводять дослід холостого ходу трансформатора (п. 3.3.6) і вимірюють струм I_1 та напругу U_2 . Ця напруга чисельно дорівнює електрорушійній силі E_{2M} взаємоіндукції: $U_2 = E_{2M} = I_1 Z_M$. Тут $Z_M = X_M = 2\pi f M$ – опір взаємної індуктивності двох котушок на частоті f . Звідси

$$M = \frac{U_2}{2\pi f I_1}.$$

(Кінець примітки)

3.4.3 За дослідними даними (пункти 3.3.6 та 3.3.7 робочого завдання) обчислити величини $\cos \varphi$ та M . Занести ці результати до таблиці 3.3.

3.4.4 Оформити звіт з результатів виконання експериментальної частини завдання згідно до діючих вимог [5].

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- 1 Теорія електричних і магнітних кіл / С. В. Панченко, О. М. Ананьєва, М. М. Бабаєв та ін. Харків: УкрДУЗТ, 2020. 246 с. URL: <http://lib.kart.edu.ua/handle/123456789/5408>
- 2 Електротехніка та електромеханіка систем залізничної автоматики/ М. М. Бабаєв, М. Г. Давиденко, Г. І. Загарій та ін. Харків: УкрДАЗТ, 2011. 606 с.
- 3 Теоретичні основи електротехніки. Практикум / С. М. Тихонравов, О. Є. Зінченко, Н. П. Карпенко та ін. Харків: УкрДУЗТ, 2019. 151 с. URL: <http://lib.kart.edu.ua/bitstream/123456789/2173/1/%d0%9d%d0%b0%d0%b2%d1%87%d0%b0%d0%bb%d1%8c%d0%bd%d0%b8%d0%b9%20%d0%bf%d0%be%d1%81%d1%96%d0%b1%d0%bd%d0%b8%d0%ba.pdf>
- 4 Маляр В. С. Теоретичні основи електротехніки. Львів: Вид-во Львів. Політехніки, 2018. 416 с.
- 5 Студентська навчальна звітність. Текстова частина (пояснювальна записка). Загальні вимоги до побудови, викладення та оформлення: метод. посіб. з додержання вимог нормоконтролю в студ. навч. звітності / Л. М. Козар, Є. В. Коновалов, А. О. Лапко та ін. Харків: УкрДУЗТ, 2014. 46 с. URL: <http://lib.kart.edu.ua/handle/123456789/3454>

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ТА ЗАВДАННЯ
до виконання розрахунково-графічної роботи

з дисципліни

«ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ»

розділ

«ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА

З ІНДУКТИВНО ЗВ'ЯЗАНИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ»

Відповідальний за випуск Давиденко М. Г.

Підписано до друку 13.11.2024 р.
Умовн. друк. арк. 2,5. Тираж . Замовлення № .
Видавець та виготовлювач Український державний університет залізничного
транспорту,
61050, Харків-50, майдан Фейєрбаха,7.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 6100 від 21.03.2018 р.