

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ



ХАРКІВСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання контрольної роботи за темами

«РОЗРАХУНОК СКЛАДНОГО КОЛА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ»,
«РОЗРАХУНОК РОЗГАЛУЖЕНОГО КОЛА СИНУСОЇДНОГО СТРУМУ»

з дисципліни "Електротехніка" (для студентів усіх форм навчання напрямку 0926 - «Водні ресурси»), дисципліни "Електротехніка в будівництві" (для студентів усіх форм навчання напрямку 0921 - «Будівництво»), дисципліни "Теоретичні основи електротехніки" (для студентів усіх форм навчання напрямку 0502 - «Менеджмент»)

Харків – 2007

Методичні вказівки

до виконання контрольної роботи за темами «Розрахунок складного кола постійного струму», «Розрахунок розгалуженого кола синусоїдного струму» з дисципліни "Електротехніка" (для студентів усіх форм навчання напрямку 0926 - «Водні ресурси»), дисципліни "Електротехніка в будівництві" (для студентів усіх форм навчання напрямку 0921 - «Будівництво»), дисципліни "Теоретичні основи електротехніки" (для студентів усіх форм навчання напрямку 0502 - «Менеджмент»). Укл.: Форкун Я.Б., Юрченко С.М., Дорохов О.В. – Харків: ХНАМГ, 2007. – 31 с.

Укладачі: доц., к.т.н. Я.Б. Форкун,
ст. викл. С.М. Юрченко,
ас. к.т.н. О.В. Дорохов.

Рецензент: доц., к.т.н. В.П. Самошкін.

**Рекомендовано кафедрою електротехніки,
протокол № 3 від 18.10.2007 р.**

ЗМІСТ

	Стор.
ВСТУП	3
Задача № 1. Розрахунок складного кола постійного струму	4
1.1. Теоретичні пояснення	4
1.2. Вихідні дані для розрахунку задачі №1	12
1.3. Приклад розрахунку задачі №1	14
Задача № 2. Розрахунок розгалуженого кола синусоїдного струму	17
2.1. Теоретичні пояснення	17
2.2. Вихідні дані для розрахунку задачі №2	24
2.3. Приклад розрахунку задачі №2	27
Джерела інформації	30

ВСТУП

Ці методичні вказівки підготовлені на основі робочих програм навчальних дисциплін «Електротехніка» та "Електротехніка в будівництві" і призначені для студентів неелектротехнічних спеціальностей. Для цих спеціальностей курс загальної електротехніки не є профілюючим, але надає загальні відомості, без яких неможливо вивчити принцип дії різноманітних пристроїв, що живляться електричною енергією та застосовуються в будівництві, тепло-, газо- та водогосподарстві (електричних насосів, кранових механізмів тощо), а також електричних пристроїв, які саме і надають електричну енергію (електричних машин, трансформаторів, перетворювальних пристроїв).

Ці методичні вказівки також можна використати для виконання контрольних робіт, які дозволять провести проміжний контроль з дисципліни «Теоретичні основи електротехніки» для студентів напрямку 0502 - «Менеджмент» спеціальності 6.050200 - «Менеджмент організацій паливно-енергетичного комплексу».

Виходячи з того, що на вивчення цих дисциплін відводиться мінімум часу, студентам пропонується виконати контрольну роботу за темами «Розрахунок електричних кіл постійного струму» (задача №1) і «Розрахунок електричних кіл синусоїдного струму» (задача № 2).

Таким чином, після вивчення даного курсу студент повинен мати загальне уявлення про роботу електричних кіл на постійному й змінному струмі та вміти їх розраховувати.

1. ЗАДАЧА № 1

«РОЗРАХУНОК СКЛАДНОГО КОЛА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ»

1.1. Теоретичні пояснення

Спочатку розберемося в деяких визначеннях, які будуть зустрічатися в цих методичних вказівках.

Електричним колом, як відомо, називають сукупність з'єднаних один з одним джерел електромагнітної енергії і споживачів електромагнітної енергії, по яких може протікати електричний струм.

Постійним струмом називають струм, не змінний у часі (маються на увазі величина та напрямок). Постійний струм позначають літерою I .

Джерела електричної енергії перетворюють хімічну, механічну та інші види енергії в електричну. Джерело електричної енергії характеризується величиною та напрямом електрорушійної сили (EPC , E) і величиною внутрішнього опору R_0 . При розрахунку і аналізі електричних кіл джерело електричної енергії замінюють розрахунковим еквівалентом. В якості останнього може бути:

1) *джерело EPC* з послідовно ввімкненим внутрішнім опором R_0 , який в ідеальному випадку дорівнює нулю (прийнято позначати літерою E);

2) *джерело струму* з паралельно ввімкненим внутрішнім опором R_0 , який в ідеальному випадку дорівнює нескінченності (прийнято позначати літерою j).

При виконанні задачі № 1 досліджуються схеми тільки з джерелами EPC , внутрішній опір яких вважають рівним нулю.

Електричний опір в загальному випадку має дві складові – активну і реактивну, але в колах постійного струму реактивна складова дорівнює нулю (з цим параметром можна буде ознайомитись при аналізі й розрахунку кіл синусоїдного струму, при вивченні теми 2). Тобто при вивченні теми 1 ми маємо справу тільки з активним опором, який позначають літерою R .

Вузол – точка на схемі, де з'єднуються три і більше вітки. *Вітки*, приєднані до одних і тих самих вузлів, називаються паралельними.

Контур – будь-який замкнутий шлях, що проходить по декількох вітках.

Електричні кола, в яких діє тільки одне джерело електричної енергії, називають *простими колами*.

У свою чергу, електричні кола, що складаються тільки з однієї вітки (*вітка* - ділянка кола, утворена кількома послідовно з'єднаними елементами – рис.1.1) і утворюють тільки один контур (*контур* – будь-який замкнутий шлях, що проходить по декількох вітках) називаються *нерозгалуженими колами*.

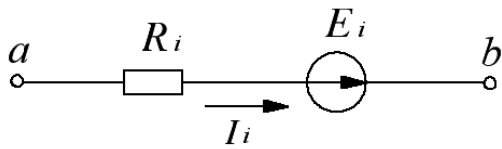


Рис. 1.1

При розрахунку будь-якого нерозгалуженого, або розгалуженого простого кола достатньо скористатися фундаментальними законами електротехніки, а саме законами Ома і Кірхгофа.

Для ділянки кола, що зображена на рис. 1.1, закон Ома має вигляд

$$I_i = \frac{E_i + \varphi_a - \varphi_b}{R_i} = \frac{E_i + U_{ab}}{R_i}, \quad (1.1)$$

де φ_a та φ_b – електричні потенціали відповідних точок.

Напруга на будь-яких затискачах дорівнює різниці потенціалів цих затискачів. Для схеми рис. 1.1 маємо: $U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b$.

Якщо вітка має декілька ЕРС і опорів, то діють так:

- ЕРС алгебраїчно складають у чисельнику рівняння (1.1) (орієнтуючись при складанні на напрямок струму, тобто беруть ЕРС зі знаком «+», якщо її напрям співпадає з напрямом струму, та зі знаком «-» у протилежному випадку);
- опори арифметично підсумовують у знаменнику того ж рівняння.

За допомогою закону Ома також знаходять спад напруги на будь-якому опорі кола. Наприклад, для схеми рис. 1.1 маємо: $U_{R_i} = I_i \cdot R_i$.

У деяких випадках коло можна спростити, замінивши послідовно (рис. 1.2) та паралельно (рис. 1.3) з'єднані опори еквівалентним опором.

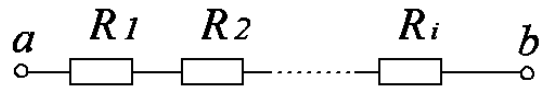


Рис. 1.2

$$R_{ab}(R_{екв}) = R_1 + R_2 + \dots + R_i = \sum_{k=1}^i R_k \quad \text{— для ділянки кола рис. 1.2.} \quad (1.2)$$

$$\frac{1}{R_{ab}} = \frac{1}{R_{екв}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_i} = \sum_{k=1}^i \frac{1}{R_k} \quad \text{— для схеми рис. 1.3.} \quad (1.3)$$

Величина, зворотня опору, називається *електричною провідністю*. Її позначають літерою G .

$$G_i = \frac{1}{R_i}. \quad (1.4)$$

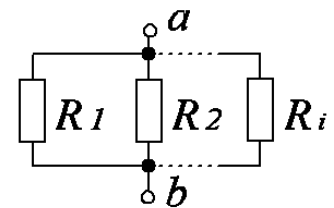


Рис. 1.3

Слід відмітити, що в розгалужених колах дуже поширене з'єднання опорів «зіркою» (якщо три опори під'єднані до одного вузла) або «трикутником»

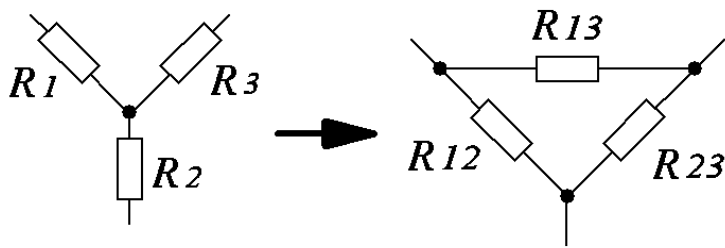


Рис. 1.4

(якщо між кожним з трьох опорів є вузли). У деяких випадках в колі необхідно проводити перетворення «зірки» опорів у «трикутник» (рис. 1.4), або навпаки (рис. 1.5).

Формули (1.5) застосовують для переходу від «трикутника» опорів до «зірки», а (1.6) - для переходу від «трикутника» до зірки «опорів».

$$R_{12} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2 + R_3}; \quad R_{13} = \frac{R_1 \cdot R_3}{R_1 + R_2 + R_3}; \quad R_{23} = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_1 + R_2 + R_3}. \quad (1.5)$$

При перетворенні «зірка» – «трикутник» маємо формули, аналогічні за структурою формулам (1.5), але не для опорів, а для провідностей віток.

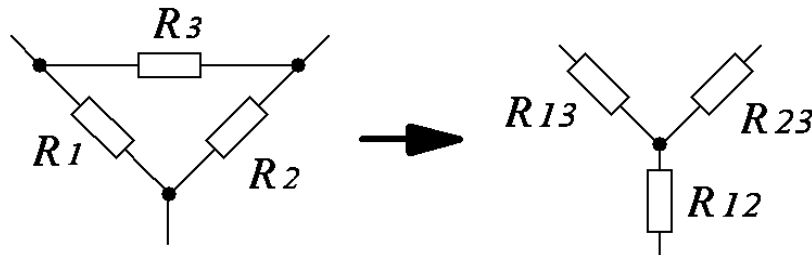


Рис. 1.5

$$G_{12} = \frac{G_1 \cdot G_2}{G_1 + G_2 + G_3}; \quad G_{13} = \frac{G_1 \cdot G_3}{G_1 + G_2 + G_3}; \quad G_{23} = \frac{G_2 \cdot G_3}{G_1 + G_2 + G_3}. \quad (1.6)$$

Режим роботи електричного кола будь-якої складності й розгалуженості повністю характеризується системою рівнянь, складених на підставі першого та другого законів Кірхгофа. Закони Кірхгофа універсальні: за їх допомогою можна здійснювати розрахунок як електричних кіл постійного, так і змінного струмів (аналіз та розрахунок кіл синусоїдного струму, як окремого випадку кіл змінного струму, проводиться при вивченні теми 2).

Перший закон Кірхгофа випливає з принципу неперервності електричного струму і відображає той факт, що всі заряди, які притікають до вузла електричного кола, витікають з нього. Тому за першим законом Кірхгофа *алгебраїчна сума струмів віток, які сходяться у вузлі, дорівнює нулю*. Іншими словами, сума струмів, спрямованих до вузла, дорівнює сумі струмів, спрямованих від вузла.

Оскільки під час розрахунку розгалужених електричних кіл дійсні напрями струмів у вітках здебільшого невідомі, то для складання рівнянь Кірхгофа необхідно задатись умовно додатними напрями струмів у вітках, позначивши

їх на схемі стрілками. Якщо у відповідній вітці є *EPC*, то найбільш доцільно, зважаючи на енергетичний баланс (див. нижче), направляти струми за напрямом цієї *EPC*. Якщо в результаті розрахунку отримаємо для деякого струму від'ємне значення, це означає, що дійсний напрям струму протилежний до показаного на схемі стрілкою.

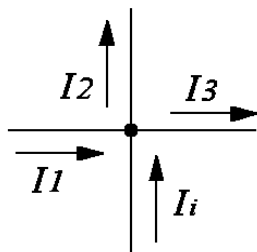


Рис. 1.6.

$$\sum_{k=1}^i I_k = 0 \text{ — 1-й закон Кірхгофа.} \quad (1.7)$$

$$I_1 - I_2 - I_3 + I_i = 0 \text{ — для схеми рис. 1.6.}$$

Другий закон Кірхгофа стосується електричного контуру: *в замкненому контурі алгебраїчна сума падінь напруг на опорах всіх елементів контуру дорівнює алгебраїчній сумі EPC, що діють в цьому контурі*. Під час складання рівнянь за другим законом Кірхгофа необхідно правильно визначати знаки спадів напруг та *EPC*. Відзначимо, що напрями обходу кожного контуру вибирають довільно. Перед спадом напруги $I_k \cdot R_k$ ставиться знак «+», якщо напрям обходу контуру співпадає з вибраним додатним напрямом струму в даному опорі, і знак «-», якщо ці напрями протилежні. Якщо напрям обходу контуру співпадає з напрямом *EPC*, то ця *EPC* входить до рівняння зі знаком «+», і навпаки.

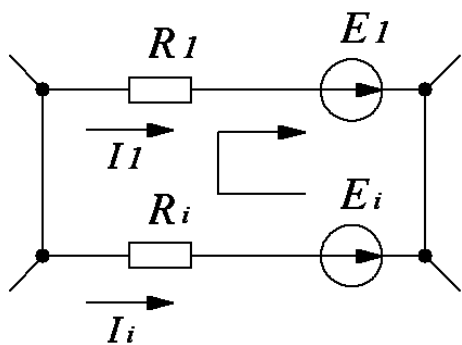


Рис. 1.7

$$\sum_{k=1}^i \pm I_k \cdot R_k = \sum_{k=1}^l \pm E_k \text{ — 2-й закон Кірхгофа (загальний вигляд).} \quad (1.8)$$

$$I_1 \cdot R_1 - I_i \cdot R_i = E_1 - E_i \text{ — для схеми рис. 1.7.}$$

За першим законом Кірхгофа для розгалуженого електричного кола можна скласти $t = n - 1$ рівнянь (де n – кількість вузлів). За другим законом Кірхгофа для розгалуженого електричного кола можна скласти $p = t - n + 1$ рівнянь (де t – кількість віток електричного кола).

Розглянемо *енергетичний баланс* в електричних колах.

При протіканні струмів по опорах в останніх виділяється тепло. На підставі закону збереження енергії кількість тепла, що виділяється за одиницю часу в

опорах схеми, повинна дорівнювати енергії, яку доставляють за той же час джерела живлення. Розходження не повинно перевищувати 5% .

Рівняння енергетичного балансу при живленні тільки від джерел *ЕРС* (як для задачі №1) має вигляд (потужність позначають літерою *P*):

$$P_{\text{джерела}} = \sum_{k=1}^l \pm E_k \cdot I_k ; \quad P_{\text{навантаження}} = \sum_{k=1}^i I_k^2 \cdot R_k ; \quad \sum_{k=1}^l \pm E_k \cdot I_k \approx \sum_{k=1}^i I_k^2 \cdot R_k . \quad (1.9)$$

Якщо напрям струму, що протікає через джерело *ЕРС*, співпадає з напрямом *ЕРС*, то відповідна складова $E_k \cdot I_k$ береться зі знаком «+» та навпаки. Фізичне пояснення від'ємної складової $E_k \cdot I_k$ – джерело не постачає електричну енергію, а споживає її (наприклад, заряджається акумулятор).

Слід відмітити, що енергетичний баланс, або як його ще називають – баланс потужностей, є найбільш якісним і достатнім методом перевірки правильності розрахунку електричного кола.

Ще одним методом перевірки правильності розрахунків є побудова потенціальної діаграми. *Потенціальна діаграма* – це графік розподілу потенціалу вздовж замкнутого контуру або ділянки кола. По осі абсцис відкладають опори вздовж контуру, один за одним, починаючи від довільно обраної точки, потенціал якої приймають рівним нулю. По осі ординат відкладають потенціали точок контуру.

Таким чином, для розрахунку струмів у будь-якому простому розгалуженому електричному колі необхідно вміти проводити перетворення в схемі (рис. 1.2 – 1.5), тобто звести розгалужену схему до нерозгалуженої і знайти струм, що протікає через джерело, за законом Ома. Потім, застосовуючи той же закон Ома, знайти напругу на кожній вітці й струми цих віток.

Для розрахунку струмів у будь-якому складному розгалуженому електричному колі необхідно знати два закони Кірхгофа й вміти скласти енергетичний баланс для перевірки результатів розрахунку. Але, крім того, необхідно мати добру математичну підготовку для розрахунку отриманих систем лінійних алгебраїчних рівнянь (СЛАР), щоб вміти застосовувати відповідні комп'ютерні програми. Тому для практичних розрахунків електричних кіл розроблено ряд методів, які більш економічні в сенсі затрат часу й праці. У цих методах в першу чергу обчислюються допоміжні величини, а потім вже за допомогою цих величин обчислюються струми віток. Таким чином, спрощується математична частина розрахунку.

Розглянемо деякі методи розрахунку складних розгалужених електричних кіл, які застосовують для розрахунку струмів у задачі №1.

Метод контурних струмів. В основі методу - другий закон Кірхгофа. Допоміжні величини – контурні струми, які є фіктивними (їх не можна створити й виміряти в реальній схемі). Кількість рівнянь (порядок СЛАР) дорівнює кількості незалежних контурів (*незалежний* контур – це контур, що містить хоча б одну вітку, яка не входить в інші контури).

Система рівнянь для знаходження контурних струмів має вигляд

$$\begin{cases} I_{11} \cdot R_{11} + I_{22} \cdot R_{12} + \dots + I_{kk} \cdot R_{1k} = E_{11} \\ I_{11} \cdot R_{21} + I_{22} \cdot R_{22} + \dots + I_{kk} \cdot R_{2k} = E_{22} \\ \dots \\ I_{11} \cdot R_{k1} + I_{22} \cdot R_{k2} + \dots + I_{kk} \cdot R_{kk} = E_{kk} \end{cases} \quad (1.10)$$

Тут k – кількість розрахункових контурів; I_{kk} – відповідні контурні струми; $R_{11} \dots R_{kk}$ – сумарні опори відповідних контурів (власні опори контурів); $R_{1k} = R_{k1}$, $R_{2k} = R_{k2}$ і т.д. – сумарний опір вітки, яка входить до обох контурів, що розглядаються (взаємні опори контурів); $E_{11} \dots E_{kk}$ – сумарні ЕРС відповідних контурів (власні ЕРС контурів).

Якщо напрями обходу всіх контурів вибрані однаково, за напрямом годинникової стрілки або проти, то всі взаємні опори контурів входять до рівнянь системи зі знаком мінус. Якщо напрям обходу контуру співпадає з напрямом деякої ЕРС, то ця ЕРС входить до контурної ЕРС зі знаком плюс, та навпаки.

Після вирішення відповідної СЛАР і знаходження контурних струмів знаходять струми віток, як алгебраїчну суму двох контурних струмів, що протікають через відповідну вітку (або струм вітки безпосередньо дорівнює деякому контурному струму).

Метод вузлових потенціалів заснований на першому законі Кірхгофа. Допоміжні величини – вузлові потенціали, які є реальними (їх можна виміряти в реальній схемі). Врахуємо, що завжди можна один з вузлів схеми «заземлити» (потенціал його прийняти рівним нулю), тому система рівнянь для визначення інших невідомих потенціалів вузлів повинна мати $t=n-1$ рівнянь.

Система рівнянь для знаходження вузлових потенціалів має вигляд

$$\begin{cases} \varphi_1 \cdot G_{11} - \varphi_2 \cdot G_{12} - \dots - \varphi_t \cdot G_{1t} = \sum_1 E_i \cdot G_i \\ -\varphi_1 \cdot G_{21} + \varphi_2 \cdot G_{22} - \dots - \varphi_t \cdot G_{2t} = \sum_2 E_i \cdot G_i \\ \dots \\ -\varphi_1 \cdot G_{t1} - \varphi_2 \cdot G_{t2} + \dots + \varphi_t \cdot G_{tt} = \sum_t E_i \cdot G_i \end{cases} \quad (1.11)$$

де φ_i – відповідні вузлові потенціали;

$G_{11} \dots G_{tt}$ – сумарні провідності віток, які під'єднані до відповідного вузла (власні провідності вузла);

$G_{1n} = G_{n1}$, $G_{2n} = G_{n2}$ і т.д. – взаємна провідність відповідних вузлів, дорівнює сумі провідностей усіх віток, що поєднують ці вузли у одному напрямку;

$\sum_t E_i \cdot G_i$ – так звані вузлові струми відповідних вузлів, які знаходять як

алгебраїчну суму добутків $E_i \cdot G_i$ відповідних віток, що примикають до даного вузла. При цьому користуються правилом: якщо сумарна ЕРС вітки направлена до вузла, відносно якого визначається вузловий струм, то відповідний добуток беруть зі знаком "+", та навпаки.

Після вирішення відповідної СЛАР і знаходження вузлових потенціалів знаходять струми віток за законом Ома.

Метод двох вузлів. Цей метод є окремим випадком методу вузлових потенціалів. Застосовують його для знаходження струмів у схемах, що мають тільки два вузла. В такому випадку достатньо знайти напругу між двома вузлами, а потім знайти струми віток за законом Ома, аналогічно формулі (1.1).

Напругу між двома вузлами знаходять за виразом:

$$U_{ab} = \frac{\sum_{i=1}^l \pm E_i \cdot G_i}{\sum_{i=1}^m G_i}. \quad (1.12)$$

При цьому користуються правилом: якщо сумарна ЕРС вітки направлена до так званого опорного вузла, який позначено першим в індексі напруги (тобто у формулі (1.12) – це індекс a), то добуток у чисельнику, який відноситься до цієї вітки, беруть зі знаком «+», та навпаки.

Метод накладання. Допоміжні величина – часткові струми. Цей метод засновано на принципі накладання, який має таке формулювання: *струм в будь-якій вітці дорівнює алгебраїчній сумі струмів, що протікають під дією кожного джерела ЕРС окремо.*

За методом накладання:

1. Довільно направляємо струми у вітках.

2. Розраховуємо часткові струми від дії кожної ЕРС чи кожного джерела струму окремо. При цьому треба закорочувати інші джерела напруги й розмикати джерела струму (враховуємо також, що не треба закорочувати внутрішній

опір джерела напруги, якщо останній заданий).

3. Алгебраїчно підсумовуємо часткові струми, орієнтуючись при цьому на обрані напрямки струмів у вихідній схемі. При цьому користуємося правилом: якщо відповідний частковий струм співпадає з попередньо обраним умовно додатним напрямком струму тієї чи іншої вітки, то його беруть зі знаком «+».

Метод *еквівалентного генератора* (активного двополюсника) використовують для розрахунку струму в одній вітці електричного кола. В основі його лежить теорема про *еквівалентний генератор*: будь-який активний двополюсник по відношенню до виділеної вітки можна замінити еквівалентним джерелом напруги, ЕРС якого дорівнює напрузі холостої ходи, а внутрішній опір - вхідному опору пасивного двополюсника.

Порядок розрахунку за методом.

1. "Виривають" опір R у тій вітці, де треба визначити струм.

2. Визначають напругу холостої ходи на розімкнутих затискачах розриву - U_{xx} .

3. Визначають вхідний опір відносно затискачів розриву - $R_{вх}$, при цьому закорочують усі ЕРС (якщо у джерела напруги заданий внутрішній опір, то його не закорочують), і розривають усі джерела струму.

4. За формулою $I = \frac{U_{xx}}{R + R_{вх}}$ визначають струм.

Таким чином, всі методи аналізу складних розгалужених електричних кіл (як на постійному, так і на змінному струмі) дозволяють спростити математичну частину розрахунку. Необхідно відмітити, що перевірка правильності розрахунку за допомогою застосування двох методів (з подальшим співставленням отриманих результатів) не завжди буває достатньою. Тобто для перевірки розрахунку необхідно застосовувати енергетичний баланс. Можна Також додати, що в практичному сенсі для розрахунку задачі №1 найбільш економічно застосувати метод двох вузлів.

Наведемо одиниці виміру електричних величин, які використовують при роботі над задачею №1, за системою СІ (табл. 1.1).

Таблиця 1.1

<i>Електрична величина</i>	<i>Одиниця виміру</i>	<i>Електрична величина</i>	<i>Одиниця виміру</i>
Джерело ЕРС (напруга)	Вольт (В)	Електрична провідність	Сіменс (См)
Струм (джерело струму)	Ампер (А)	Електрична потужність (активна)	Ватт (Вт)
Електричний опір	Ом (Ом)		

1.2. Вихідні дані для розрахунку задачі №1

Для здобуття практичних навичок розрахунку складних розгалужених кіл постійного струму пропонується шість ідентичних схем (рис. 1.8. – 1.12), які відрізняються тільки напрямом ЕРС, та 20 варіантів числових значень параметрів ЕРС і опорів (табл. 1.2).

Правило вибору варіанта для студентів заочної форми навчання.

Варіант вибирають з таблиці за двома останніми цифрами залікової книжки. Користуються цією таблицею у такий спосіб. Студенти, дві останні цифри залікової книжки яких - номери від 01 до 20, безпосередньо беруть числові значення з таблиці відповідно до свого номера й розраховують схему, наведену на рис.1.8. Студенти, які мають номери від 21 до 40, попередньо віднімають від свого номера 20, а далі беруть числові значення з таблиці відповідно до отриманого в результаті цієї операції номера й розраховують схему, наведену на рис. 1.9. За аналогією, студенти, які мають номери від 41 до 60, попередньо віднімають від свого номера 40 й розраховують схему, наведену на рис. 1.10; студенти, які мають номери від 61 до 80, попередньо віднімають від свого номера 60 й розраховують схему, наведену на рис. 1.11, а студенти, які мають номери від 81 до 99, попередньо віднімають від свого номера 80 й розраховують схему, наведену на рис. 1.12. Студент, дві останні цифри залікової книжки якого 00 (100), розраховує схему, наведену на рис. 1.12, за варіантом 20. Наприклад, якщо ми маємо дві останні цифри залікової книжки 78, то розраховується схема, наведена на рис. 1.11, за варіантом 18 ($78-60=18$).

Правило вибору варіанта для студентів денної форми навчання.

Номер розрахункової схеми визначають за порядковим номером студента в журналі викладача наступним чином: студенти, які мають номер **1-3**, вибирають для розрахунку схему рис. 1.8, студенти, які мають номер **4-6**, вибирають схему рис. 1.9, студенти, які мають номер **7-9**, вибирають схему рис. 1.10, студенти, які мають номер **10-12**, вибирають схему рис. 1.11, студенти, які мають номер **13-15**, вибирають схему рис. 1.12, студенти, які мають номер **16-18**, вибирають схему рис. 1.13, але міняють на протилежний (!) напрямом ЕРС E_3 (далі – спочатку). Вибір вихідних даних з табл. 1.2 такий же, як і для студентів заочної форми навчання (за двома останніми цифрами залікової книжки і вище описаним правилом вибору), або, якщо кількість студентів у групі не більше 20, за порядковим номером студента в журналі викладача. Наприклад, якщо студент має порядковий номер у журналі викладача 8 і дві останні цифри залікової книжки 55, то він розраховує схему рис. 1.10 за вихідними даними варіанта 15 ($55-40=15$) табл. 1.2 .

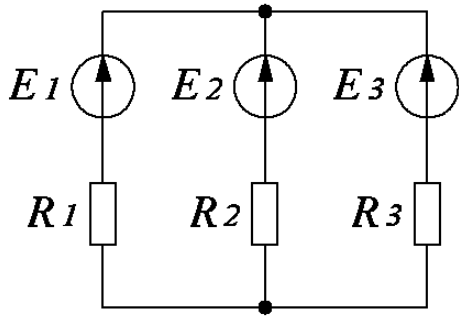


Рис. 1.8

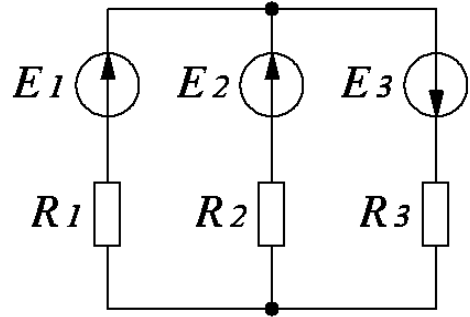


Рис. 1.9

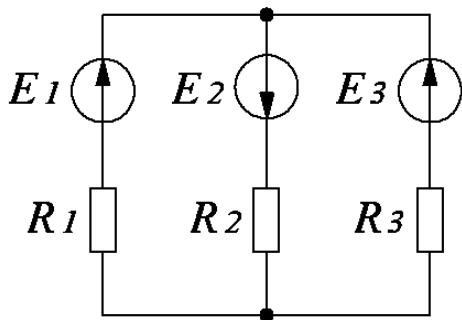


Рис. 1.10

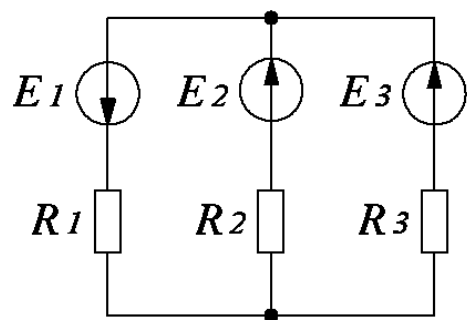


Рис. 1.11

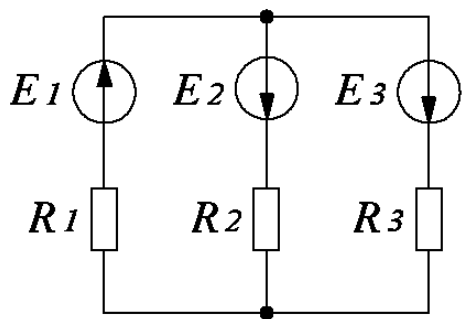


Рис. 1.12

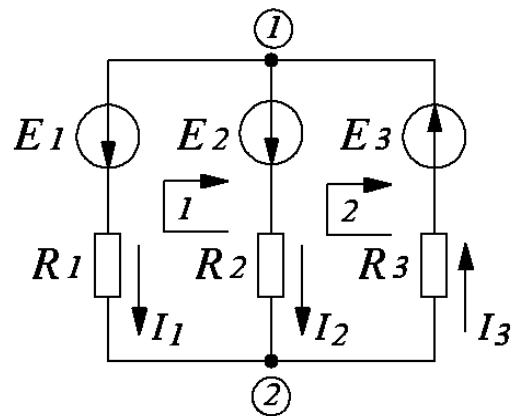


Рис. 1.13

Електричні схеми треба виконувати згідно з вимогами державних стандартів із застосуванням креслярського приладдя. Загальне оформлення контрольної роботи – згідно з ДСТУ 3008-95. Документація. Звіти у сфері науки й техніки.

Студентам пропонується таке *робоче завдання* до виконання задачі №1:

- 1) Розрахувати струми в схемі за допомогою законів Кірхгофа.
- 2) Розрахувати струми в схемі за допомогою методу контурних струмів.
- 3) Розрахувати струми в схемі за допомогою методу двох вузлів.

- 4) Перевірити правильність розрахунку за допомогою енергетичного балансу.
- 5) Побудувати потенційну діаграму для зовнішнього контуру схеми.
- 6) Розрахувати струми в схемі за допомогою методу накладання.
- 7) Розрахувати один із струмів методом еквівалентного генератора.

Таблиця 1.2

№ варіанта	$E_1, В$	$E_2, В$	$E_3, В$	$R_1, Ом$	$R_2, Ом$	$R_3, Ом$	№ вар.	$E_1, В$	$E_2, В$	$E_3, В$	$R_1, Ом$	$R_2, Ом$	$R_3, Ом$
01	40	100	80	4	4	5	11	10	40	10	5	8	2
02	20	100	60	10	5	5	12	40	20	10	10	5	4
03	60	160	120	2	4	4	13	120	160	60	4	4	2
04	70	100	40	1	1	1	14	20	40	100	2	4	5
05	120	80	20	20	20	10	15	75	20	100	25	10	20
06	160	60	120	4	2	4	16	100	20	60	5	10	5
07	20	40	160	1	2	2	17	40	10	20	5	5	5
08	160	40	20	2	2	1	18	20	100	75	10	20	25
09	10	20	30	6	8	3	19	50	60	40	5	6	4
10	130	125	50	10	7,5	10	20	30	20	10	3	8	6

1.3. Приклад розрахунку задачі №1

Розрахуємо схему, наведену на рис. 1.13, за числовими значеннями параметрів ЕРС та опорів, що відповідають варіанту 01 з табл. 1.2. Задаємо умовно додатними напрямками струмів у вітках – за напрямками відповідних ЕРС, позначивши їх на схемі стрілками.

Розрахунок струмів у схемі за допомогою законів Кірхгофа.

Складаємо систему рівнянь за законами Кірхгофа (одне рівняння за першим законом і два – за другим). Вирішуємо цю систему на комп'ютері (програми Solver 1.1).

$$\begin{cases} -I_1 - I_2 + I_3 = 0 \\ -I_1 \cdot R_1 + I_2 \cdot R_2 = -E_1 + E_2 \\ -I_2 \cdot R_2 - I_3 \cdot R_3 = -E_2 - E_3 \end{cases} ; \quad \begin{cases} -I_1 - I_2 + I_3 = 0 \\ -I_1 \cdot 4 + I_2 \cdot 4 = 60; \\ I_2 \cdot 4 + I_3 \cdot 5 = 180 \end{cases} \quad \begin{cases} I_1 = 3,214 \text{ А}; \\ I_2 = 18,214 \text{ А}; \\ I_3 = 21,429 \text{ А}. \end{cases}$$

Розрахунок струмів у схемі за допомогою методу контурних струмів.

Обходимо обидва контури за годинниковою стрілкою. Складаємо систему рівнянь відносно контурних струмів. Знаходимо власні опори, взаємні опори й контурні ЕРС. Вирішуємо систему.

$$\begin{aligned} R_{11} &= R_1 + R_2; & \begin{cases} I_{11} \cdot 8 - I_{22} \cdot 4 = 60 \\ -I_{11} \cdot 4 + I_{22} \cdot 9 = -180 \end{cases}; \\ R_{22} &= R_2 + R_3, ; \\ R_{12} &= R_{21} = R_2, ; \\ E_{11} &= -E_1 + E_2; & I_{11} = -3,214 \text{ А}; \\ E_{22} &= -E_2 - E_3. & I_{22} = -21,429 \text{ А}. \end{aligned}$$

Знаходимо струмі віток через відповідні контурні струми:

$$\begin{aligned} I_1 &= -I_{11} = 3,214 \text{ А}; & I_2 &= I_{11} - I_{22} = 18,215 \text{ А}; \\ I_3 &= -I_{22} = 21,429 \text{ А}. \end{aligned}$$

Розрахунок струмів у схемі за допомогою методу двох вузлів.

Знаходимо напругу між вузлами 1 і 2 (відмічаємо, що опорний вузол – вузол з індексом 1):

$$U_{12} = \frac{-\frac{E_1}{R_1} - \frac{E_2}{R_2} + \frac{E_3}{R_3}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}} = -27,143 \text{ В}.$$

Знаходимо струми віток за законом Ома:

$$\begin{aligned} I_1 &= \frac{E_1 + U_{12}}{R_1} = 3,214 \text{ А}; & I_2 &= \frac{E_2 + U_{12}}{R_2} = 18,214 \text{ А}; \\ I_3 &= \frac{E_3 - U_{12}}{R_3} = 21,429 \text{ А}. \end{aligned}$$

Перевірка правильності розрахунку за допомогою енергетичного балансу.

Складаємо рівняння енергетичного балансу. Оскільки умовно додатні напрями струмів у вітках були обрані за напрямками відповідних ЕРС (рис. 1.13), то всі складові у лівій частині енергетичного балансу (на стороні джерел) будуть зі знаком плюс.

$$P_{\text{джерела}} = E_1 \cdot I_1 + E_2 \cdot I_2 + E_3 \cdot I_3 = 3664,28 \text{ Вт};$$

$$P_{\text{навантаження}} = I_1^2 \cdot R_1 + I_2^2 \cdot R_2 + I_3^2 \cdot R_3 = 3664,328 \text{ Вт}.$$

$$P_{\text{джерела}} \approx P_{\text{навантаження}}; \quad 3664,28 \text{ Вт} \approx 3664,328 \text{ Вт}.$$

Розрахунок струмів у схемі за допомогою методу накладання.

Для розрахунку маємо три часткові схеми – від дії кожного з джерел схеми відокремлено від інших (відповідно від дії E_1 , E_2 і E_3 – рис. 1.14а, 1.14б і 1.14в). Для кожної часткової схеми розраховуємо часткові струми, враховуючи, що всі ці схеми – прості розгалужені.

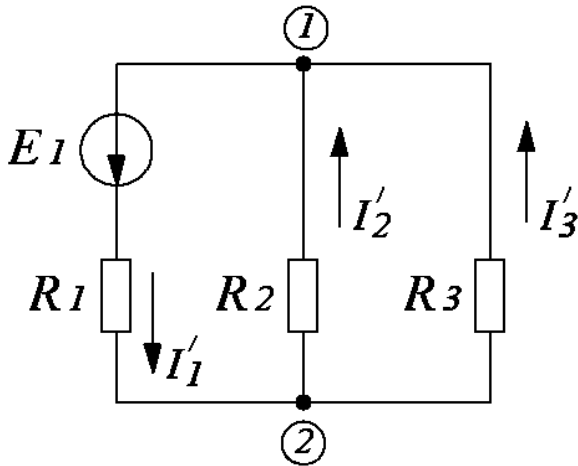


Рис. 1.14

Розрахуємо першу часткову схему (рис. 1.14):

$$\frac{1}{R_{23}} = \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} = \frac{R_2 + R_3}{R_2 \cdot R_3};$$

$$R_{23} = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3} = 2,222 \text{ Ом}; I_1' = \frac{E_1}{R_1 + R_{23}} = 6,429 \text{ А}; U_{12}' = I_1' \cdot R_{23} = 14,285 \text{ В};$$

$$I_2' = \frac{U_{12}'}{R_2} = 3,571 \text{ А}; I_3' = \frac{U_{12}'}{R_3} = 2,857 \text{ А}.$$

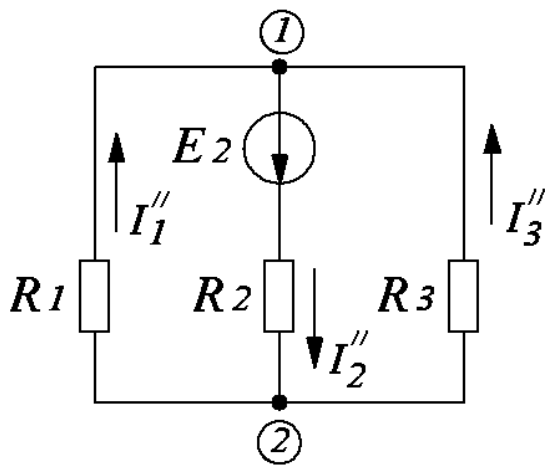


Рис. 1.15

Друга часткова схема (рис. 1.15):

$$R_{13} = \frac{R_1 \cdot R_3}{R_1 + R_3} = 2,222 \text{ Ом};$$

$$I_2'' = \frac{E_2}{R_2 + R_{13}} = 16,072 \text{ А};$$

$$U_{12}'' = I_2'' \cdot R_{13} = 35,712 \text{ В}$$

$$I_1'' = \frac{U_{12}''}{R_1} = 8,928 \text{ А};$$

$$I_3'' = \frac{U_{12}''}{R_3} = 7,142 \text{ А}.$$

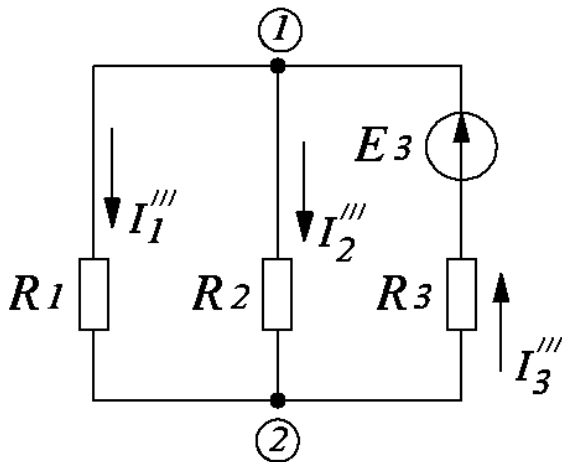


Рис. 1.16

Третя часткова схема (рис. 1.16):

$$R_{12} = \frac{R_2 \cdot R_1}{R_2 + R_1} = 2 \text{ Ом};$$

$$I_3''' = \frac{E_3}{R_3 + R_{12}} = 11,429 \text{ А};$$

$$U_{12}''' = I_3''' \cdot R_{12} = 22,858 \text{ В};$$

$$I_2''' = \frac{U_{12}'''}{R_2} = 5,715 \text{ А}; I_1''' = \frac{U_{12}'''}{R_1} = 5,715 \text{ А}.$$

Знаходимо струми віток через відповідні часткові струми:

$$I_1 = I_1' - I_1'' + I_1''' = 3,216 \text{ А}; \quad I_2 = -I_2' + I_2'' + I_2''' = 18,216 \text{ А}$$

$$I_3 = I_3' + I_3'' + I_3''' = 21,428 \text{ А} .$$

Визначення струму I_2 методом *еквівалентного генератора*

1. "Вириваємо" опір R_2 у тій вітці, де треба визначити струм.

2. Визначаємо напругу холостого ходу на розімкнутих затискачах розриву

$$- U_{xx} = I_{xx} \cdot R_1 - E_1 + E_2 = \left(\frac{E_3 + E_1}{R_3 + R_1} \right) \cdot R_1 - E_1 + E_2 = 113,333 \text{ А}.$$

3. Визначаємо вхідний опір відносно затискачів розриву при цьому зако-
рочують усі ЕРС - $R_{ex} = \frac{R_1 \cdot R_3}{R_1 + R_3} = 2,222 \text{ Ом}.$

4. Визначаємо струм: $I_2 = \frac{U_{xx}}{R_2 + R_{ex}} = 18,215 \text{ А}.$

Примітка: порядок побудови потенційної діаграми наведено в літературі [1], методичних вказівках [3] та ін.

Таким чином, струми віток, розраховані різними методами, співпадають з практично нульовою похибкою. Така сама картина і з енергетичним балансом.

При розрахунках без допомоги обчислювальної техніки, а також при округленні до одного знака після коми можлива більша похибка. В інженерних розрахунках дозволяється похибка до 5%.

Оцінюємо похибку за таким виразом:

$$\delta = \frac{F_i - F_i'}{F_i} \cdot 100 \% \leq 5\% , \quad (1.13)$$

де F_i – найбільше з отриманих різними методами розрахунку значення функції (струму, напруги, потужності і т.п.);

F_i' – найменше з отриманих різними методами розрахунку значення функції (струму, напруги, потужності і т.п.).

2. ЗАДАЧА № 2

РОЗРАХУНОК РОЗГАЛУЖЕНОГО КОЛА СИНУСОЇДНОГО СТРУМУ

2.1. Теоретичні пояснення

Спочатку розберемося в деяких визначеннях, що характеризують кола синусоїдного струму.

Струм, який змінюється у часі за величиною і напрямом, називається

змінним. Один з напрямів змінного струму вважають додатнім, а інший відповідно від'ємним. Значення струму в даний момент часу називають миттєвим значенням. Кожному моменту часу відповідає певне за величиною і напрямом значення змінного струму.

Змінний струм, миттєве значення якого повторюється через рівні проміжки часу, називається *періодичним*, а найменший проміжок часу, через який відбувається повторення - періодом змінного струму. Серед періодичних змінних струмів найбільше поширення має *гармонічний струм*, що є синусоїдною функцією часу (рис. 2.1).

Таким чином, струм, що змінюється за законом синуса, називається *синусоїдним* або *гармонічним* (рис.2.1). Миттєве значення такого струму:

$$i = I_m \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi) = I_m \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t + \varphi) = I_m \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi}{T} \cdot t + \varphi\right), \quad (2.1)$$

де I_m – амплітудне, тобто максимальне значення струму, А;

φ – початкова фаза, визначає величину зсуву синусоїди відносно нуля (якщо $\varphi > 0$ синусоїда зсунута вліво, а якщо $\varphi < 0$ синусоїда зсунута вправо), градуси або радіани (рад);

T – період, тобто час, за який відбувається одне повне коливання, с;

f – частота коливань, тобто кількість коливань в секунду, $1/\text{с}=\text{Гц}$;

ω - кутова частота, $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$, рад/с;

$(\omega \cdot t + \varphi)$ – фаза, аргумент синуса, характеризує стан коливання (рад).

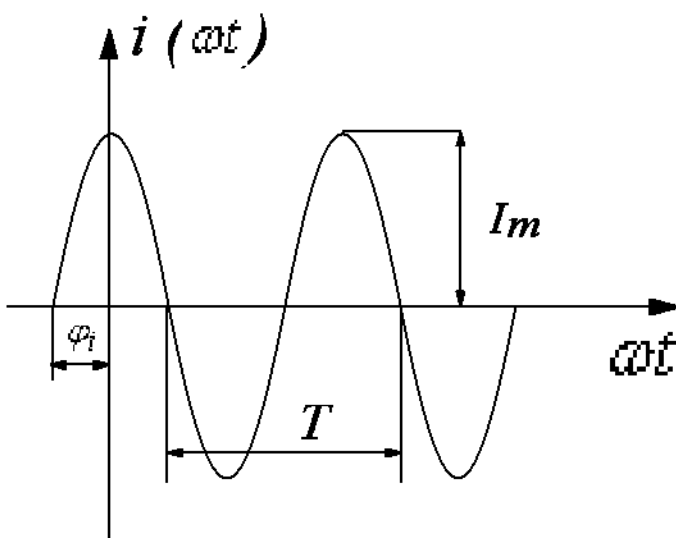


Рис. 2.1

Якщо в синусоїдних величинах однієї частоти однакові початкові фази, то говорять, що такі синусоїдні величини співпадають за фазою; якщо різниця фаз між синусоїдними функціями становить $\pm \pi$, то говорять, що ці функції знаходяться у протифазі, якщо різниця фаз між синусоїдними функціями становить $\pm \pi/2$, то говорять, що ці функції знаходяться у квадратурі

Частота f струму зв'язана з періодом T залежністю: $f = 1/T$. Таким чином, синусоїдний струм характеризується трьома величинами: амплітудою, частотою і початковою фазою. До речі, постійний струм можна розглядати, як ча-

стковий випадок змінного струму при $f = 0$. Діапазон частот змінних струмів, що використовуються в техніці, складає від десятків герц до мегагерц. Промислова частота синусоїдного струму, як відомо, складає 50 Гц (в США – 60 Гц).

Аналогічно до струму синусоїдними функціями є напруга та ЕРС джерела живлення (чи струм джерела струму). Розраховуючи кола змінного струму, "прив'язуються" до якогось одного напрямку джерела живлення, який і вважають додатнім, або, можна так мовити, до верхньої чи нижньої півхвилі. Зрозуміло, що при зміні напрямку джерела живлення, з тією ж частотою будуть змінювати свій напрям і всі інші електричні величини, що діють в колі (струми, падіння напруги і т.п.).

Окрім вже розглянутих амплітудного та миттєвого значень, синусоїдну величину характеризують діючим значенням, яке пов'язане з амплітудним, зокрема, для струму, формулою: $I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$. Зауважимо, що більшість електровимірювальних приладів реагує саме на діючі значення відповідних величин.

На практиці кола розраховують або за амплітудними значеннями величин, при необхідності обраховуючи потім для них діючі значення, або за діючими, першочергово переходячи від амплітуд джерел, що діють у колі, до їх діючих значень.

Розглянемо електричні елементи, що діють у колах змінного струму. Окрім активних опорів, з якими ми вже познайомились при вивченні кіл постійного струму, в колах змінного струму діють так звані реактивні опори, які представлені двома загальними різновидами.

1) *Котушки індуктивності*, індуктивність яких прийнято позначати літерою L . Індуктивний опір (який має одиницю виміру – Ом) котушки визначають за виразом: $x_L = \omega \cdot L$. Потрібно відзначити дуже важливе правило: *напруга на ідеальному індуктивному елементі випереджує за фазою струм, що протікає через цей елемент, на кут 90° .*

2) *Конденсатори*, електричну ємність яких прийнято позначати літерою C . Ємнісний опір (який має одиницю виміру – Ом) конденсатора визначають за виразом: $x_C = \frac{1}{\omega \cdot C}$. Треба відзначити дуже важливе правило: *напруга на ідеальному конденсаторі відстає за фазою від струму, що протікає через цей елемент, на кут 90° .*

Треба звернути увагу, що опір реактивних елементів, на відміну від активних, залежить від частоти. Виходячи з цього, можна зробити висновок: якщо реактивні елементи ввімкнути в коло постійного струму, то конденсатор буде

розривати відповідну вітку ($x_C = \frac{1}{0 \cdot C} = \infty$ Ом), а котушка індуктивності – зако-
рочувати саму себе ($x_L = 0 \cdot L = 0$ Ом).

Розглянемо найбільш поширений *комплексний (символічний) метод роз-
рахунку кіл синусоїдного струму*.

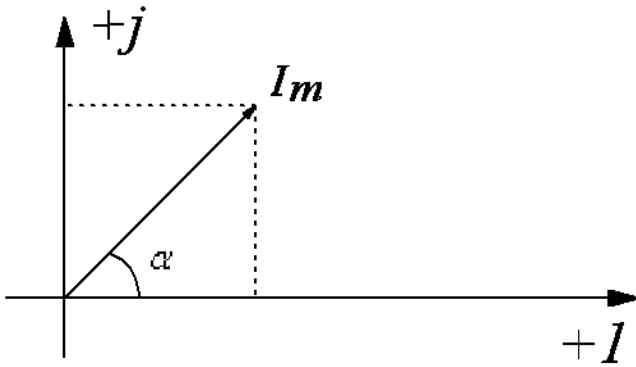


Рис. 2.2

Зауважимо, що застосування ком-
плексного методу стає можливим
завдяки тому, що всі синусоїдні ве-
личини в колі діють з однаковою
частотою. Під час розрахунку про-
цесів в електричних колах змінного
струму необхідно виконувати ари-
фметичні операції над синусоїдни-

ми величинами. Це пов'язано з громіздкими і трудомісткими перетвореннями.
Суттєве спрощення розрахунків досягається, якщо перейти від синусоїдних фу-
нкцій часу до їх зображення за допомогою комплексних чисел.

Пояснимо, як це можна здійснити на прикладі виразу (2.1), прийнявши
 $(\omega t + \varphi_i) = \alpha$. З курсу математики відома формула Ейлера
 $e^{j \cdot \alpha} = \cos \alpha + j \cdot \sin \alpha$. Помножимо цей вираз на I_m і отримаємо:

$$I_m \cdot e^{j \cdot \alpha} = I_m \cdot \cos \alpha + j \cdot I_m \cdot \sin \alpha. \quad (2.2)$$

Візьмемо комплексну площину й відкладемо по осі абсцис дійсну частину
комплексного числа (2.2), а по осі ординат – уявну. Тоді вектор довжиною I_m ,
спрямований під кутом $(\omega t + \varphi_i) = \alpha$ до осі абсцис (рис. 2.2), буде символічним
відображенням синусоїдного струму (2.1). Це пояснюється тим, що між митте-
вим значенням струму $i(\omega t)$ і вектором I_m існує однозначний зв'язок: в кожний
момент часу значення струму визначається проекцією вектора I_m на уявну
вісь. Застосування математичного апарату комплексного числення дає змогу
замінити операції диференціювання та інтегрування арифметичними діями, а
операції над синусоїдними функціями – операціями над комплексними числа-
ми.

Перехід від миттєвого значення струму, напруги і т.п. до відповідного
комплексу і навпаки не має труднощів. Наприклад, комплекс амплітудного зна-
чення струму для (2.1) має вигляд: $\underline{I}_m = I_m \cdot e^{j \cdot \varphi_i}$ або більш скорочено та зруч-
но: $\underline{I}_m = I_m \angle \varphi_i$. Потрібно тільки не забувати про множник $\sqrt{2}$ при переході

від амплітудних значень до діючих та навпаки.

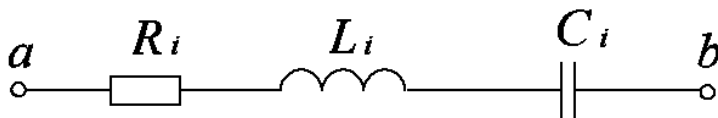


Рис. 2.3

Розглянемо порядок запису комплексного опору (\underline{Z}_i) та комплексної провідності (\underline{Y}_i) ділянки кола.

Для ділянки кола, зображеної на рис. 2.3, яка містить всі можливі елементи, маємо вираз:

$$\underline{Z}_i = R_i + j \cdot (x_{L_i} - x_{C_i}) = R_i + j \cdot \left(\omega \cdot L_i - \frac{1}{\omega \cdot C_i} \right); \quad \underline{Y}_i = \frac{1}{\underline{Z}_i}. \quad (2.3)$$

Якщо ж видалити з цієї ділянки будь-який елемент, то відповідна йому частина виразу (2.3) буде відсутня (дорівнювати нулю). Комплексний опір на схемі має таке саме зображення, як активний опір, але позначається літерою \underline{Z} .

Наведемо формули для переходу від алгебраїчної форми запису комплексного числа (дійсна та уявна частини) до полярної (модуль і кут) і навпаки:

$$A \angle \pm \alpha = A \cdot \cos \alpha \pm j \cdot A \cdot \sin \alpha;$$

$$a + j \cdot b = \sqrt{a^2 + b^2} \angle \arctg b/a \quad \text{— для рис. 2.4,а;}$$

$$a - j \cdot b = \sqrt{a^2 + b^2} \angle \arctg(-b/a) \quad \text{— для рис. 2.4,б;} \quad (2.4)$$

$$-a + j \cdot b = \sqrt{a^2 + b^2} \angle (180^\circ - \arctg b/a) \quad \text{— для рис. 2.4,в;}$$

$$-a - j \cdot b = \sqrt{a^2 + b^2} \angle -(180^\circ - \arctg b/a) \quad \text{— для рис. 2.4,г.}$$

Наведені вирази (2.4) проілюстровані на рис. 2.4.

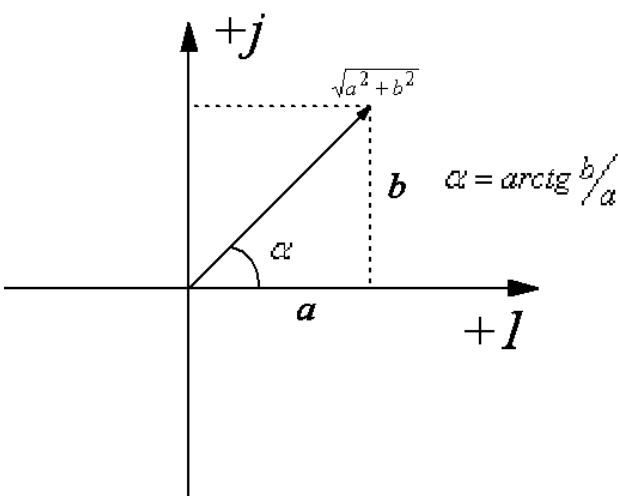


Рис. 2.4,а

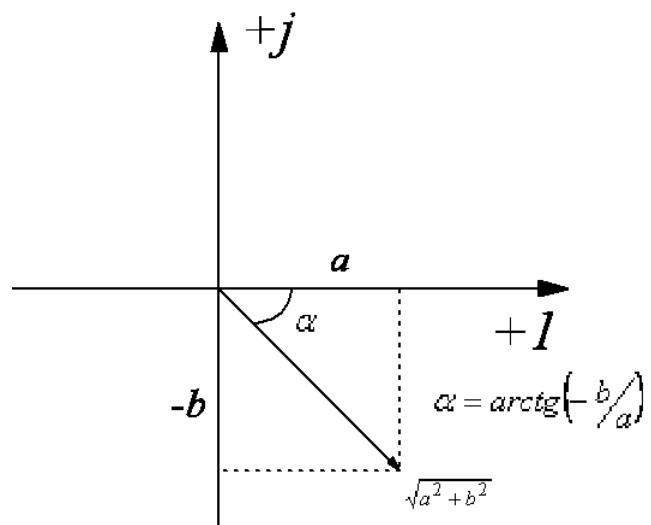


Рис. 2.4,б

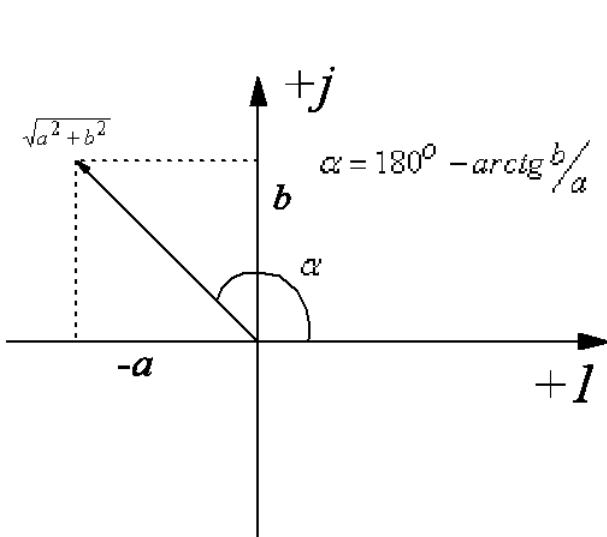


Рис. 2.4,в

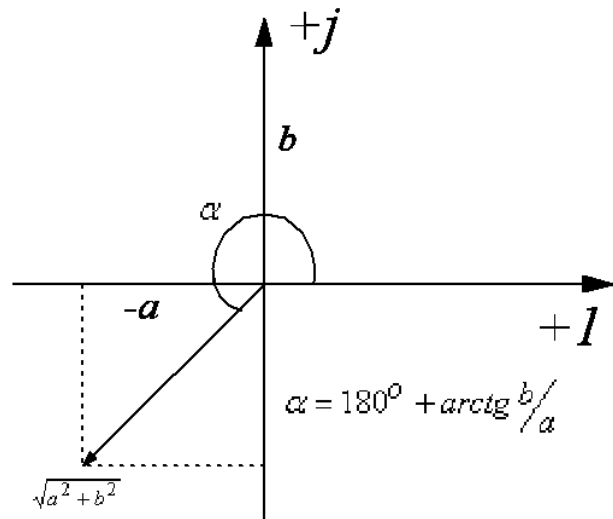


Рис. 2.4,г

Зауважимо, що коли перед полярною формою комплексного числа стоїть знак «-» (тобто вектор A розгорнутий у протилежну сторону), то необхідно або відразу змінити кут полярної форми на $\pm 180^\circ$, або при переході до алгебраїчної форми змінити знак одночасно перед дійсною і уявною частинами.

Наведемо правила для здійснення математичних операцій з комплексними числами.

Якщо маємо два комплексних числа $\underline{Z}_1 = a_1 + j \cdot b_1 = M_1 \angle \alpha_1$ і $\underline{Z}_2 = a_2 + j \cdot b_2 = M_2 \angle \alpha_2$, то:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 &= (a_1 + a_2) + j \cdot (b_1 + b_2); & \underline{Z}_1 \cdot \underline{Z}_2 &= M_1 \cdot M_2 \angle (\alpha_1 + \alpha_2); \\ \underline{Z}_1 - \underline{Z}_2 &= (a_1 - a_2) + j \cdot (b_1 - b_2); & \frac{\underline{Z}_1}{\underline{Z}_2} &= \frac{M_1}{M_2} \angle (\alpha_1 - \alpha_2); \\ \sqrt[n]{\underline{Z}_1} &= \sqrt[n]{M_1} \angle \frac{\alpha_1}{n}; & (\underline{Z}_1)^n &= (M_1)^n \angle n \cdot \alpha_1. \end{aligned} \quad (2.5)$$

Можна відмітити, що складання і віднімання комплексних чисел зручно проводити в алгебраїчній формі, а всі інші операції – в полярній.

Всі фундаментальні закони електротехніки (закон Ома, закони Кірхгофа та інші), що застосовуються для аналізу і розрахунку кіл постійного струму, можуть застосовуватися і для кіл змінного струму. Наприклад, якщо до зати-скачів ділянки кола, зображеної на рис. 2.3, підвести напругу $u_{ab}(\omega t)$ та записати комплекс її амплітудного значення \underline{U}_{mab} , то закон Ома для цієї ділянки матиме вигляд

$$\underline{I}_{m.i} = \frac{\underline{U}_{m.ab}}{\underline{Z}_i}. \quad (2.6)$$

Як було розглянуто при вивченні постійного струму, для аналізу і розрахунку складних розгалужених кіл розроблено ряд методів, що спрощують математичну частину розрахунку. *Всі ці методи придатні для розрахунку кіл змінного струму комплексним методом.*

Таким чином, при розрахунку кола змінного струму будь-якої складності й розгалуженості комплексним (символічним) методом потрібно застосовувати ті самі закони і методи, як і для кіл постійного струму, але всі математичні операції проводяться не із звичайними, а з комплексними числами.

Розглянемо особливості складання *енергетичного балансу* в електричних колах змінного гармонічного струму.

Потужність в колах синусоїдного струму має три складових:

1) *активну* (позначається літерою P), яка завжди має тільки додатні значення, Вт;

2) *реактивну* (позначається літерою Q), реактивна потужність додатна при відстаючому струмі ($R-L$ навантаження, $\varphi > 0$) і негативна при випереджаючому струмі ($R-C$ навантаження, $\varphi < 0$), тобто індуктивність можна розглядати як споживач реактивної енергії, а ємність – як її генератор), ВАР;

3) *повну* (позначається літерою S), яка є результуючою, ВА.

Всі складові пов'язані між собою виразом: $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$.

При застосуванні комплексного методу розрахунку енергетичний баланс обчислюють за такими виразами:

$$\tilde{S}_{\text{навантаження}} = \sum_{k=1}^i \underline{I}_k^* \cdot \underline{U}_{Z_k} = \sum_{k=1}^i \underline{I}_k^* \cdot (\underline{Z}_k \cdot \underline{I}_k) = \sum_{k=1}^i I_k^2 \cdot \underline{Z}_k = P_H \pm j \cdot Q_H; \quad (2.7)$$

$$\tilde{S}_{\text{джерела}} = \sum_{k=1}^i \underline{E}_k \cdot \underline{I}_k^* = P_{дж} \pm j \cdot Q_{дж}; \quad P_{дж} \approx P_H; \quad Q_{дж} \approx Q_H.$$

В першу чергу необхідно зауважити, що баланс складається для *діючих* значень напруг та струмів. По-друге, баланс аналізується окремо для активної, та окремо для реактивної складових потужності. Розходження, зрозуміло, аналізується також окремо для кожної складової і не повинно перевищувати, як і раніше, 5% (інженерна точність).

Зірка над будь-якою величиною при роботі з комплексами позначає, що мається на увазі *комплекс спряжений*, що на практиці означає, що у комплексі відповідної величини в полярній формі треба змінити знак кута на протилежний (наочно це буде видно при розрахунку енергетичного балансу у задачі №2).

Наведемо одиниці виміру електричних величин, які добавляються при

розрахунку кіл синусоїдного струму (при роботі над задачею №2), за системою СІ (табл. 2.1).

Таблиця 2.1

<i>Електрична Величина</i>	<i>Одиниця виміру</i>	<i>Електрична величина</i>	<i>Одиниця виміру</i>
Електрична індуктивність	Генрі (Гн)	Реактивна потужність	Вольтампери реактивні (ВАр)
Електрична Ємність	Фарад (Ф)	Повна потужність	Вольтампери (ВА)
Частота	Герц (Гц)	Кутова частота	Радіан-секунди ($\frac{рад}{с}$)
Період	Секунди (с)		

2.2. Вихідні дані для розрахунку задачі №2

Для здобуття практичних навичок розрахунку складних розгалужених кіл постійного струму пропонується п'ять ідентичних схем (рис. 2.5. – 2.9), які відрізняються тільки набором елементів у кожній вітці, та 20 варіантів числових значень параметрів елементів (табл. 2.2). Варіант з таблиці, як і в задачі №1, потрібно вибирати за двома останніми цифрами залікової книжки. Нагадаємо, яким чином це проводиться.

Правило вибору варіанта для студентів заочної форми навчання.

Варіант вибирають з таблиці за двома останніми цифрами залікової книжки. Користуються цією таблицею у такий спосіб. Студенти, дві останні цифри залікової книжки яких - номери від 01 до 20, безпосередньо беруть числові значення з таблиці відповідно до свого номера й розраховують схему, наведену на рис.2.5. Студенти, які мають номери від 21 до 40, попередньо віднімають від свого номера 20, а далі беруть числові значення з таблиці відповідно до отриманого в результаті цієї операції номера й розраховують схему, наведену на рис. 2.6. За аналогією, студенти, які мають номери від 41 до 60, попередньо віднімають від свого номера 40 й розраховують схему, наведену на рис. 2.7; студенти, які мають номери від 61 до 80, попередньо віднімають від свого номера 60 й розраховують схему, наведену на рис. 2.8, а студенти, які мають номери від 81 до 99, попередньо віднімають від свого номера 80 й розраховують схему, наведену на рис. 2.9. Студент, дві останні цифри залікової книжки якого 00 (100), розраховує схему, наведену на рис. 2.9, за варіантом 20.

Правило вибору варіанта для студентів денної форми навчання.

Номер розрахункової схеми визначають за порядковим номером студента в журналі викладача наступним чином: студенти, які мають номер **1-3**, вибирають для розрахунку схему рис. 2.5, студенти, які мають номер **4-6**, вибирають схему рис. 2.6, студенти, які мають номер **7-9**, вибирають схему рис. 2.7, студенти, які мають номер **10-12**, вибирають схему рис. 2.8, студенти, які мають номер **13-15**, вибирають схему рис. 2.9, студенти, які мають номер **16-18**, вибирають схему рис. 2.10, але міняють на протилежний (!) напрямок ЕРС E_3 (далі – спочатку). Вибір вихідних даних з табл. 1.2 такий же, як і для студентів заочної форми навчання (за двома останніми цифрами залікової книжки і вище описаним правилом вибору), або, якщо кількість студентів у групі не більше 20, за порядковим номером студента в журналі викладача. Наприклад, якщо студент має порядковий номер у журналі викладача 12 і дві останні цифри залікової книжки 75, то він розраховує схему рис.2.8 за вихідними даними варіанта 15 (75-60) табл..2.2.

Таблиця 2.2

<i>№ варіанта</i>	<i>E, В</i>	<i>φ_E</i>	<i>f(ωt)</i>	<i>R, Ом</i>	<i>L, мГн</i>	<i>C, мкФ</i>	<i>№ вар.</i>	<i>E, В</i>	<i>φ_E</i>	<i>f(ωt)</i>	<i>R, Ом</i>	<i>L, мГн</i>	<i>C, мкФ</i>
01	100	30°	<i>e</i>	10	50	300	11	200	60°	<i>e</i>	25	150	100
02	110	45°	<i>u₁₂</i>	12	55	275	12	190	90°	<i>u₁₂</i>	45	120	50
03	120	60°	<i>i₁</i>	14	60	250	13	180	30°	<i>i₁</i>	40	100	45
04	130	90°	<i>i₂</i>	16	65	235	14	170	45°	<i>i₂</i>	20	85	60
05	140	30°	<i>i₃</i>	18	70	220	15	160	60°	<i>i₃</i>	18	75	185
06	150	45°	<i>e</i>	20	75	200	16	150	90°	<i>e</i>	16	70	200
07	160	60°	<i>u₁₂</i>	25	85	190	17	140	30°	<i>u₁₂</i>	14	65	235
08	170	90°	<i>i₁</i>	40	100	50	18	130	45°	<i>i₁</i>	12	60	220
09	180	30°	<i>i₂</i>	50	120	45	19	120	60°	<i>i₂</i>	10	55	300
10	190	45°	<i>i₃</i>	80	150	40	20	100	90°	<i>i₃</i>	22	50	120

Примітки:

- 1) у табл. 2.2 подані діючі значення ЕРС;
- 2) частота для всіх варіантів – 50 Гц (відповідно, кутова частота дорівнює $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 = 314 \text{ рад/с}$);
- 3) 1мГн = 0,001 Гн; 1мкФ = $1 \cdot 10^{-6} = 0,000001$ Ф.

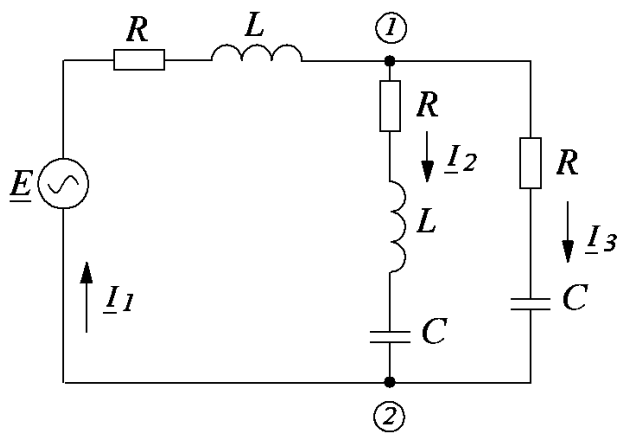


Рис. 2.5

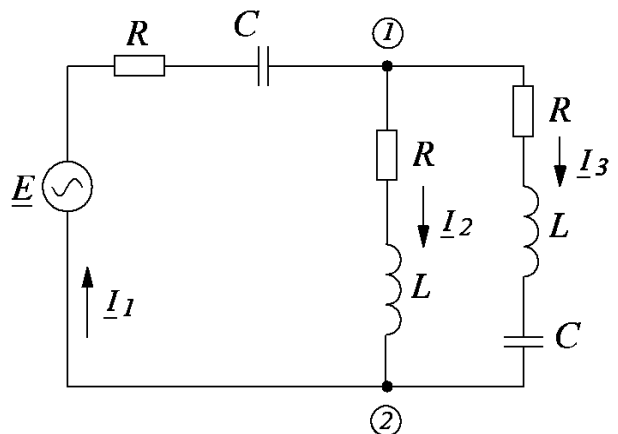


Рис. 2.6

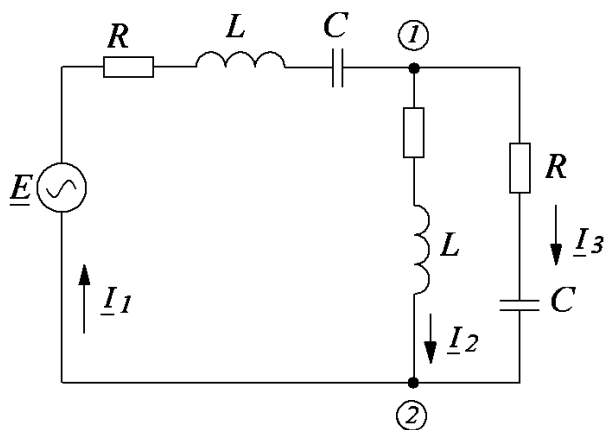


Рис. 2.7

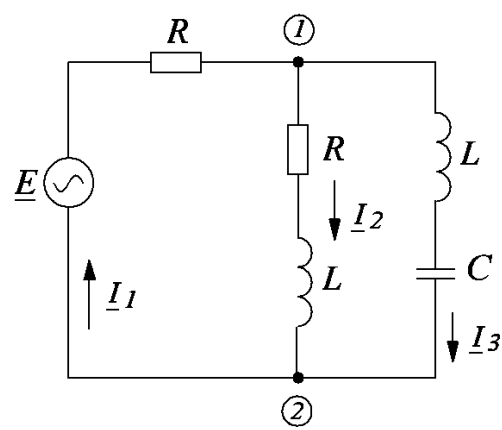


Рис. 2.8

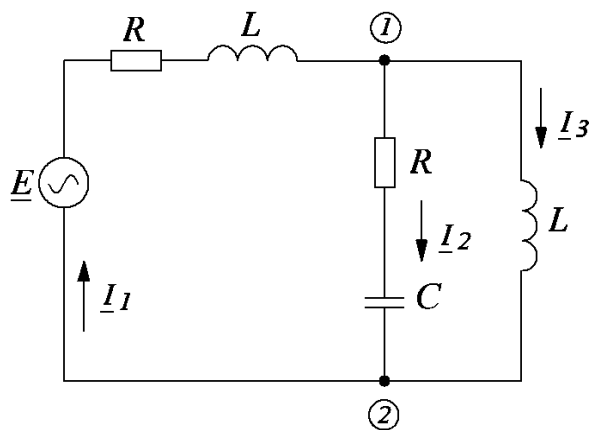


Рис. 2.9

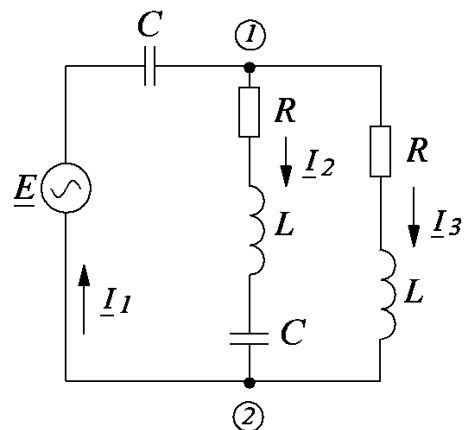


Рис. 2.10

Студентам пропонується таке **робоче завдання** до виконання задачі №2:

- 1) Записати комплексні опори всіх віток.
- 2) Розрахувати комплексним методом всі струми в схемі (за законом Ома).
- 3) Перевірити правильність розрахунку за допомогою енергетичного балансу.
- 4) Записати миттєве значення та побудувати синусоїдну функцію часу (хвильову діаграму) для величини, зазначеної у табл. 2.2 (стовпчики $f(\omega t)$).
- 5) За вказівкою викладача побудувати векторну діаграму струмів та топографі-

чну діаграму напруг кола.

Нагадуємо, що при оформленні текстових документів необхідно дотримуватись ДСТУ 3008-95. Документація. Звіти у сфері науки й техніки (як і при оформленні задачі №1). Електричні схеми необхідно виконувати згідно з вимогами державних стандартів із застосуванням креслярського приладдя.

2.3. Приклад розрахунку задачі №2

Розрахуємо схему, наведену на рис. 2.10 за вихідними даними, що відповідають варіанту 01 з табл. 2.2. При розрахунках використовуємо інженерний калькулятор, який має режим для операцій із комплексними числами. При розрахунках дотримуємося такої точності: для лінійних величин – 3 знаки після коми, для кутових величин – 1 знак після коми. Розрахунковий додатний напрям струмів вже задано на схемах (рис. 2.5 – 2.10). Для будь-якої розрахункової величини зручно відразу записувати обидві форми комплексного числа: алгебраїчну і полярну.

Розрахунок комплексних опорів всіх віток.

$$\underline{Z}_1 = -j \cdot x_C = -j \cdot \frac{1}{\omega \cdot C} = -j \cdot 10,616 = 10,616 \angle -90^\circ \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_2 = R + j \cdot (x_L - x_C) = R + j \cdot \left(\omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C} \right) = 10 + j \cdot 5,084 = 11,218 \angle 26,9^\circ \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_3 = R + j \cdot x_L = R + j \cdot \omega \cdot L = 10 + j \cdot 15,7 = 18,614 \angle 57,5^\circ \text{ Ом}.$$

Маємо схему для розрахунку комплексним методом (рис. 2.9):

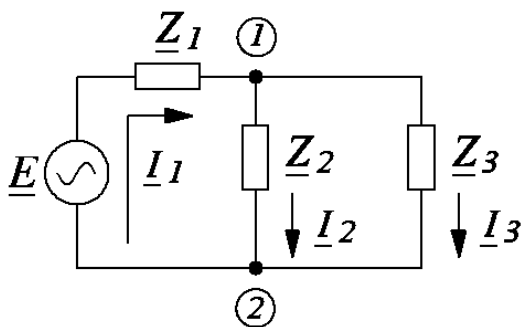


Рис. 2.9

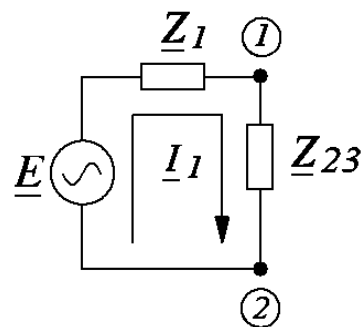


Рис. 2.10

Перетворимо паралельно з'єднані опори 2 і 3 віток і отримаємо спрощену схему (рис. 2.10):

$$\underline{Z}_{23} = \frac{\underline{Z}_2 \cdot \underline{Z}_3}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3} = \frac{11,218 \angle 26,9^\circ \cdot 18,614 \angle 57,5^\circ}{10 + j \cdot 5,084 + 10 + j \cdot 15,7} = 7,239 \angle 38,3^\circ = (5,681 + j \cdot 4,487) \text{ Ом}.$$

Розрахунок всіх струмів схеми.

Знайдемо струм I_1 за законом Ома:

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{E}}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_{23}} = \frac{100 \angle 30^\circ}{-j \cdot 10,616 + 5,681 + j \cdot 4,487} =$$

$$= 11,966 \angle 77,2^\circ = (2,651 + j \cdot 11,669) \text{ A.}$$

Знайдемо напругу на затискачах 1 і 2:

$$\underline{U}_{12} = \underline{I}_1 \cdot \underline{Z}_{23} = 11,966 \angle 77,2^\circ \cdot 7,239 \angle 38,3^\circ = 86,622 \angle 115,5^\circ \text{ В.}$$

Знайдемо струми в паралельних вітках за законом Ома:

$$\underline{I}_2 = \frac{\underline{U}_{12}}{\underline{Z}_2} = \frac{86,622 \angle 115,5^\circ}{11,218 \angle 26,9^\circ} = 7,722 \angle 88,6^\circ = (0,189 + j \cdot 7,72) \text{ A};$$

$$\underline{I}_3 = \frac{\underline{U}_{12}}{\underline{Z}_3} = \frac{86,622 \angle 115,5^\circ}{18,614 \angle 57,5^\circ} = 4,654 \angle 58^\circ = (2,466 + j \cdot 3,947) \text{ A.}$$

Перевірка правильності розрахунку за допомогою енергетичного балансу.

Знайдемо потужність джерела:

$$\tilde{S}_{\text{джерела}}^* = \underline{E} \cdot \underline{I}_1 = 100 \angle 30^\circ \cdot 11,966 \angle -77,2^\circ = 1196,6 \angle -47,2^\circ =$$

$$= (813,019 - j \cdot 877,981) \text{ ВА} = P_{\text{джерела}} \pm j \cdot Q_{\text{джерела}}.$$

Знайдемо потужності, які виділяються на комплексних опорах кола:

$$\tilde{S}_1^* = \underline{I}_1 \cdot (\underline{I}_1 \cdot \underline{Z}_1) = 11,966 \angle -77,2^\circ \cdot (11,966 \angle 77,2^\circ \cdot 10,616 \angle -90^\circ) =$$

$$= 1520,054 \angle -90^\circ = -j \cdot 1520,054 \text{ ВА} = P_1 \pm j \cdot Q_1;$$

$$\tilde{S}_2^* = \underline{I}_2 \cdot \underline{U}_{12} = 7,722 \angle -88,6^\circ \cdot 86,622 \angle 115,5^\circ = 668,895 \angle 26,9^\circ =$$

$$= (596,519 + j \cdot 302,631) \text{ ВА} = P_2 \pm j \cdot Q_2;$$

$$\tilde{S}_3^* = \underline{I}_3 \cdot \underline{U}_{12} = 4,654 \angle -58^\circ \cdot 86,622 \angle 115,5^\circ = 403,139 \angle 57,5^\circ =$$

$$= (216,606 + j \cdot 340,004) \text{ ВА} = P_3 \pm j \cdot Q_3.$$

$$P_{\text{навантаження}} = \sum_{k=1}^m P_k = P_1 + P_2 + P_3 = 0 + 596,519 + 216,606 = 813,125 \text{ Вт};$$

$$Q_{\text{навантаження}} = \sum_{k=1}^m Q_k = Q_1 + Q_2 + Q_3 = -1520,054 + 302,631 + 340,004 =$$

$$= -877,419 \text{ ВАр.}$$

$$P_{\text{джерела}} \approx P_{\text{навантаження}}; \quad 813,019 \text{ Вт} \approx 813,125 \text{ Вт.}$$

$$Q_{\text{джерела}} \approx Q_{\text{навантаження}}; \quad -877,981 \text{ ВАр} \approx -877,419 \text{ ВАр.}$$

Таким чином, енергетичний баланс сходиться з практично нульовою похибкою.

Побудова синусоїдної функції часу для заданої величини.

За завданням потрібно записати миттєве значення та побудувати синусоїдну функцію часу (хвильову діаграму) для ЕРС, тобто $e(\omega t)$ для даного варіанту. Запишемо миттєве значення, враховуючи, що розрахунок кола проводився за діючими значеннями (тобто необхідно модуль ЕРС помножити на $\sqrt{2}$):

$$e(\omega t) = 100 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(314 \cdot t + 30^\circ) = 141 \cdot \sin(314 \cdot t + 30^\circ), \text{ В.}$$

Далі потрібно побудувати синусоїду. Найбільш точна й наочна побудова будь-якої функції, заданої аналітично, проводиться за допомогою табулювання аналітичного виразу цієї функції. Враховуючи рівень сучасної обчислювальної техніки, цю побудову можна виконати дуже малим кроком (відстанню між сусідніми розрахунковими точками) та на будь-якому інтервалі. Зосередимо увагу на тому, що синусоїду можна будувати, підставляючи в аналітичний вираз або час у секундах (тоді початкова фаза обов'язково повинні бути в радіанах), або ωt – у градусах. Другий шлях не залежить від частоти, і в нашому випадку – більш зручний. Проведемо табулювання аналітичного виразу для $e(\omega t)$ з кроком 15° на інтервалі $0 \leq t \leq 2 \cdot \pi$ (табл. 2.3). Синусоїдна функція часу (хвильова діаграма) для ЕРС наведена на рис. 2.11.

При табулюванні й побудові застосовуємо табличний процесор Microsoft Excel з пакету MicroSoft Office XP.

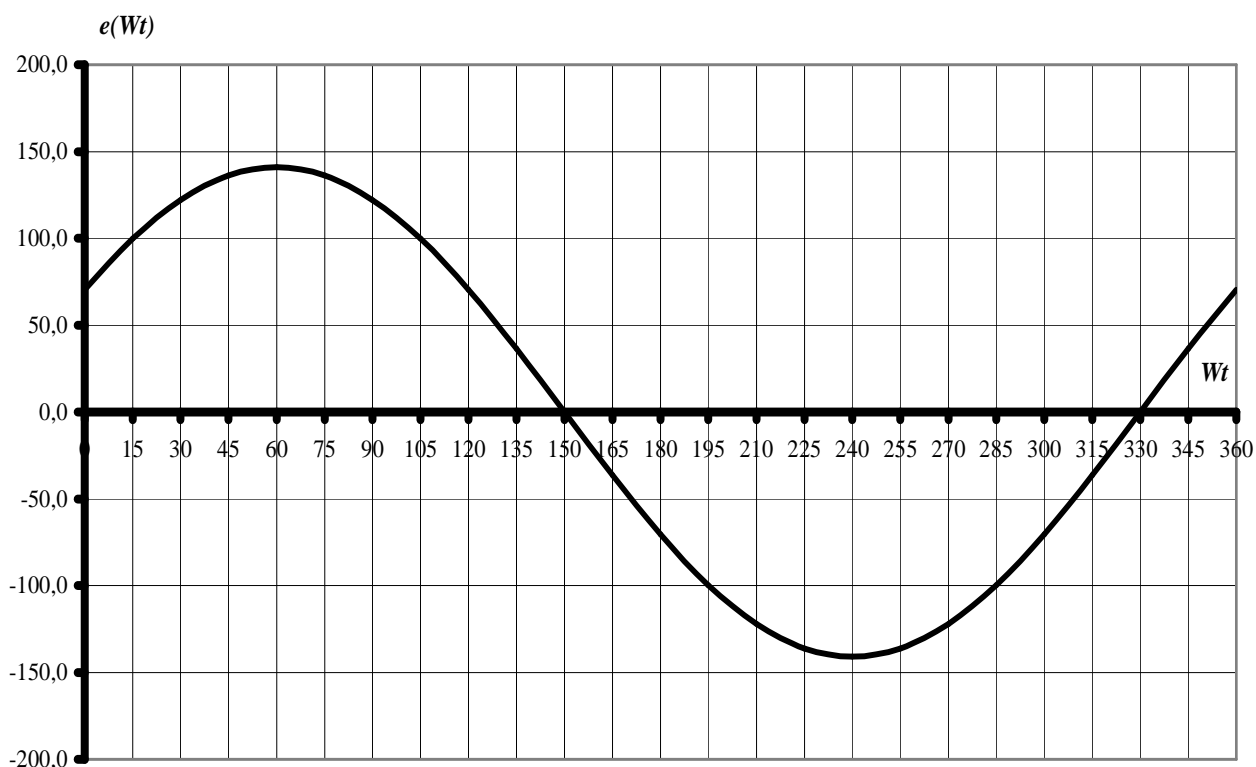


Рис. 2.11

Таблиця 2.3

ωt	$e(\omega t), \text{В}$	ωt	$e(\omega t), \text{В}$	ωt	$e(\omega t), \text{В}$	ωt	$e(\omega t), \text{В}$
0	70,5	90	122,1	180	-70,5	270	-122,1
15	99,7	105	99,7	195	-99,7	285	-99,7
30	122,1	120	70,5	210	-122,1	300	-70,5
45	136,2	135	36,5	225	-136,2	315	-36,5
60	141,0	150	0,0	240	-141,0	330	0,0
75	136,2	165	-36,5	255	-136,2	345	36,5
						360	70,5

Примітка: правило побудови векторної діаграми струмів та векторно-топографічної діаграми напруг кола наведено в літературі [1], методичних вказівках [3] та ін.

ДЖЕРЕЛА ІНФОРМАЦІЇ

Наведемо джерела інформації, які використовувались при підготовці цих методичних вказівок, і які можуть бути корисними для самопідготовки студентів та всіх інших бажаючих вивчити основи електротехніки.

При підготовці методичних вказівок були використані:

- 1) Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: Учебник.- М.: Гардарики, 2002 – 640 с.
- 2) Шегедін О.І., Маляр В.С. Теоретичні основи електротехніки. Частина 1: Навчальний посібник для студентів дистанційної форми навчання електротехнічних та електромеханічних спеціальностей вищих навчальних закладів. – Львів: Новий Світ-2000, 2004. – 168 с.
- 3) Методичні вказівки до виконання курсової роботи за темою "Аналіз складного кола постійного струму і розгалуженого кола синусоїдного струму" з дисципліни "Теоретичні основи електротехніки" (для студентів 2 курсу спеціальностей 6.090603, 6.090605, 6.092202) / Укл.: Самошкін В.П., Форкун Я.Б. - Харків: ХДАМГ, 2003 - 50 с.

Додатково для вивчення принципів роботи електротехнічних пристроїв рекомендується:

- 1) Синдеев Ю.Г. Электротехника с основами электроники: Учебник для учащихся профессиональных училищ и колледжей. – Ростов-на-Дону: Феникс, 2000. – 384 с.
- та інші подібні.

У мережі Internet рекомендовано такі ресурси:

- 1) http://ssga.ru/AllMetodMaterial/metod_mat_for_ioot/metodichki/matusko/index_m.html
- 2) <http://www.toehelp.ru/theory/toe/contents.html>
- 3) <http://www.electrik.org> та інші подібні.

НАВЧАЛЬНЕ ВИДАННЯ

до виконання контрольної роботи за темами «Розрахунок складного кола постійного струму», «Розрахунок розгалуженого кола синусоїдного струму» з дисципліни "Електротехніка" (для студентів усіх форм навчання напрямку 0926 - «Водні ресурси»), дисципліни "Електротехніка в будівництві" (для студентів усіх форм навчання напрямку 0921 - «Будівництво»), дисципліни "Теоретичні основи електротехніки" (для студентів усіх форм навчання напрямку 0502 - «Менеджмент»)

Укладачі: Яна Борисівна Форкун,
Світлана Марківна Юрченко,
Олександр Володимирович Дорохов

Редактор: М.З. Аляб'єв

Комп'ютерна верстка: Я.Б. Форкун

План 2007, поз. 341М

Підп. до друку 7.12. 2007р.	Формат 60x84 1/16	Папір офісний
Друк на ризографі	Умовн.-друк.арк. 1,2	Обл.-вид. арк. 1,7
Замовл. № .	Тираж 100 прим.	

Сектор оперативної поліграфії ІОЦ ХНАМГ
61002, Харків, вул. Революції, 12