Міністерство науки та освіти України

Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій імені С.З. Ґжицького

Ціж Б.Р., Максисько О.Р., Галкіна Н.С

Електротехніка

Навчально-методичний посібник для студентів вищих навчальних закладів очної та заочної форм навчання всіх спеціальностей за напрямами підготовки 181 «Харчові технології» і 162 «Біотехнологія та біоінженерія»

Львів 2019

ББК з2 я73–1
Ц56
УДК 621.3(075.8)

Рецензенти:

П.Г. Стахів, доктор фіз.-мат. наук,професор, зав. кафедри теоретичної та загальної електротехніки Національного університету «Львівська Політехніка»

І.З. Щур, доктор тех. наук, професор кафедри електроприводу і автоматизації промислових установок Національного університету «Львівська Політехніка»

Ціж Б.Р., Максисько О.Р., Галкіна Н.С.
Електротехніка: Навч.-метод. посібник. – Львів: В-во ЛНУВМБ ім. С.З. Гжицького, 2019. – 244 с., 84 іл.

В даному навчально-методичному посібнику викладені основні відомості про електричні та магнітні кола, електротехнічні пристрої і машини, а також методичні настанови до виконання розрахункових і лабораторних робіт. До кожного розділу подані приклади розв’язування задач, задачі для самостійного розв’язування та запитання і завдання для самоконтролю та самостійної роботи.

Посібник розрахований на студентів вищих закладів освіти технічних та технологічних спеціальностей.
Іл. 84. Бібліогр: 14 назв.

Рекомендовано до друку методичною комісією факультету харчових технологій та біотехнології ЛНУВМБ імені С. З. Ґжицького.

© Ціж Б.Р., Максисько О.Р., Галкіна Н.С. 2019

ВСТУП

Електротехніка – це наука про теорію і практичне застосування електричних і магнітних явищ.

Електромагнітні, електротехнічні пристрої в житті сучасної людини відіграють надзвичайно важливу роль, як в повсякденному житті, так і у виробничій сфері. Це зумовлено суттєвими перевагами електроенергії перед іншими видами, а саме відносною простотою виробництва, можливістю практично миттєво передавати значну енергію на великі відстані при малих втратах, відносно простими методами перетворення в інші види енергії, простотою керування, високим ккд тощо. В зв'язку з цим електротехнічні пристрої необхідні в сучасному виробництві і технологіях, зокрема харчових галузей.

В першій частині даного навчально-методичного посібника викладені основні теоретичні відомості про електричні та магнітні кола, а також електротехнічні пристрої і машини, зокрема вимірювальні прилади, трансформатори, генератори та двигуни. До кожного розділу подані приклади розв'язування задач, задачі для самостійного розв'язування та запитання і завдання для самоконтролю та самостійної роботи.

В другій частині даного навчально-методичного посібника представлені методичні настанови та інструкції до виконання п'яти розрахункових робіт (чисельний експеримент) та 11 лабораторних робіт (фізичний експеримент). Запропоновані роботи охоплюють практично усі розділи навчальної дисципліни «Електротехніка».

В настановах до кожної лабораторної роботи подано у стислій формі теоретичні пояснення та необхідні для обчислення формули. Важливим є те, що кожній лабораторній роботі передує числовий експеримент, тобто розв'язок задачі за темою, що суттєво підвищує вагу експерименту. Для кращого засвоєння матеріалу дисципліни, в кі-

нці кожної лабораторної настанови запропонована достатня кількість запитань за темою роботи.

В додатках представлені основи електробезпеки, загальні та спеціальні вимоги техніки безпеки, основні одиниці вимірювання та характеристики матеріалів, які використовуються в електротехніці, приклади розв'язування типових рівнянь та побудови зображень електротехнічних величин, а також хронологія електротехнічних відкритів і винаходів людства, нарис про перші електричні дослідження та ілюстрації найважливіших електротехнічних винаходів.

Частина І. ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИЙ ПРАКТИКУМ

Розділ 1. Основні поняття електротехніки

Після вивчення даного розділу

Ви повинні знати:

1. Основні електричні величини (напруженість електричного поля, електрорушійна сила, електричний струм, напруга, опір, потужність, енергія).
2. Співвідношення між величинами, що характеризують електричне коло.
3. Одиниці вимірювання електричних величин.

Ви повинні вміти:

1.Визначати основні електричні величини.
2.Обчислити опір і провідність провідника за його фізичними величинами.
3.Пояснити поняття електричної напруги, електрорушійної сили, потужності.

Основні теоретичні відомості

Електричні явища зумовлюються наявністю електричних зарядів та електромагнітного поля.

Електростатичне поле **–** це окремий вид електромагнітного поля, яке створюється сукупністю незмінних в часі нерухомих електричних зарядів.

Напруженість електричного поля $\vec{\mathcal{E}}$ – це величина, що характеризує електричне поле в кожній точці простору як за величиною, так і за напрямом. Напруженість електричного поля дорівнює відношенню механічної сили $\vec{F}$, що діє на нерухомий пробний заряд q_0, розташований в даній точці поля, до величини цього заряду $\vec{\mathcal{E}} = \dfrac{\vec{F}}{q_0}$. Оди-

ниця вимірювання напруженості електричного поля – ***вольт на метр*** **[***В/м***]**.

Електрична напруга U – це фізична величина, що характеризує роботу електричного поля при переміщенні одиничного додатного заряду з однієї точки в іншу. $U = \frac{A}{q}$. Напруга визначається різницею потенціалів між двома точками $U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2$.

Електрорушійна сила (ЕРС) E – це фізична величина, що викликає проходження електричного струму у провідному контурі й утворюється джерелами електричної енергії. ЕРС характеризує здатність джерела енергії виконати роботу.

Одиниця вимірювання ЕРС, напруги й потенціалу є **вольт** $[B]$.

Електричний струм I – спрямований рух носіїв електричного заряду, зумовлений наявністю ЕРС у замкненому контурі. Струм I визначає кількість зарядів q, що проходить за одну секунду через довільний перетин кола $I = \frac{q}{t}$ Одиниця вимірювання струму – ***ампер*** $[A]$. Величина струму також визначається як $I = \frac{E}{R}$ чи $I = \frac{U}{R}$.

Густина струму рівна $J = \frac{I}{S}$, де I – струм в провіднику, A; S – площа поперечного перерізу, $мм^2$.

Провідне середовище характеризується електропровідністю ***G*** (одиниця вимірювання – ***сіменс*** **[***См***]**) чи електроопором ***R*** (одиниця вимірювання – ***ом*** **[***Ом***]**).

Властивість середовища, що характеризує його здатність проводити електричний струм, називають ***електропровідністю***: $G = \frac{1}{R}$, $R = \frac{1}{G}$.

Електропровідність матеріалу визначається його питомою електропровідністю γ. Величина обернена до питомої електропровідності, називається ***питомим електроопором*** $\rho = \frac{1}{\gamma}$.

Електричний опір провідника довжиною *l*, площею перерізу *S*, виготовленого з матеріалу з питомою електропровідністю γ рівний:

$$R = \frac{l}{\gamma S} = \rho \frac{l}{S}.$$

Зі зміною температури провідного середовища величини питомої провідності γ і питомого опору ρ змінюються. Залежність питомого опору провідного середовища від температури описується виразом:

$$\rho = \rho_0 \left(1 + \alpha t\right),$$

де ρ_0 – питомий опір провідного матеріалу при 0 °*C*; *t* – температура, °*C*; α – температурний коефіцієнт опору, 1/°*C*.

Залежність опору провідних матеріалів від температури визначається виразом:

$$R_2 = R_1 \left(1 + \alpha \left(t_2 - t_1\right)\right),$$

де t_1, t_2 – початкова та кінцева температури, °*C*; R_1, R_2 – опори при температурах відповідно t_1, t_2; α – температурний коефіцієнт опору, 1/°*C*.

Електрична потужність P – величина, яка характеризує швидкість зміни (перетворення) електричної енергії в часі:

$$P = \frac{dW}{dt}; \quad P = UI = RI^2 = \frac{U^2}{R}.$$

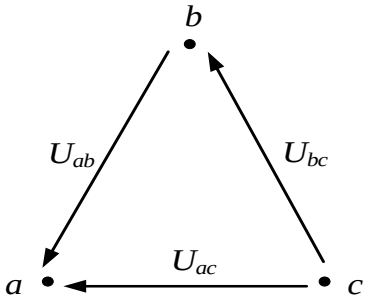
Одиниця вимірювання електричної потужності – ***ват*** [*Вт*].

Приклади розв'язування задач

Приклад 1. На заряд $Q = 16 \cdot 10^{-8}$ *Кл* діє сила $F = 2{,}4 \cdot 10^{-3}$ *Н*. Знайти напруженість електричного поля в даній точці.
Розв'язок. Напруженість поля в даній точці рівна***:***

$$\mathcal{E} = \frac{F}{Q} = \frac{2{,}4 \cdot 10^{-3}}{16 \cdot 10^{-8}} = 0{,}15 \cdot 10^{5}\ B/м.$$

Приклад 2. В електричному колі, зображеному на рисунку потенціали точок *а, в, с* відповідно дорівнюють $\varphi_a = 12\ B$, $\varphi_b = 4\ B$, $\varphi_c = 2\ B$. Обчислити напругу між цими точками.



Розв'язок. Враховуючи, що додатній напрям напруги спрямований до точки з більшим потенціалом, напруги між точками рівні:

$$U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b = 12 - 4 = 8\ B$$
$$U_{bc} = \varphi_b - \varphi_c = 4 - 2 = 2\ B$$
$$U_{ac} = \varphi_a - \varphi_c = 12 - 2 = 10\ B.$$

Приклад 3. В електричному полі при перенесенні заряду $Q = 0{,}25$ *Кл* з однієї точки в іншу була затрачена робота $A = 0{,}12$ *Дж*. Обчислити напругу між точками.
Розв'язок. Величину напруги обчислюємо за виразом:

$$U = \frac{A}{Q} = \frac{0{,}12}{0{,}25} = 0{,}48\ B.$$

Приклад 4. Для прокладання телефонної лінії довжиною l=1,5 *км* використали мідний провід перерізом 2,5 $мм^2$. Визначити опір лінії.

Розв'язок. Опір лінії визначаємо за виразом:

$$R = \rho \frac{l}{S} = \frac{0,0175 \cdot 1500}{2,5} = 10,5 \ Ом,$$

де l = 1,5 *км* = 1500 *м*; $\rho = 0,0175 \ \frac{Ом \cdot мм^2}{м}$.

Приклад 5. Для виготовлення спіралі електроплити використали ніхромовий провід довжиною 182 *м* і діаметром 2 *мм*. Обчислити опір спіралі.

Розв'язок. Переріз ніхромового проводу буде рівний:

$S = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 2^2}{4} = 3,14 \ мм^2$, тоді опір спіралі дорівнює:

$R = \rho \frac{l}{S} = \frac{0,91 \cdot 182}{3,14} = 52,7 \ Ом$, де $\rho = 0,91 \ \frac{Ом \cdot мм^2}{м}$.

Приклад 6. Опір мідної телефонної лінії, виміряний при t_1 = 10 °*C* дорівнює R = 4,5 *Ом*. Яким буде опір лінії при t_2 = 30 °*C*, якщо температурний коефіцієнт опору міді $\alpha = 0,0039 \quad 1/^\circ C$?

Розв'язок. Опір ліній при температурі 30 °*C* визначаємо за виразом

$$R_2 = R_1\left(1 + \alpha\left(t_2 - t_1\right)\right) = 4,5\left(1 + 0,0039\left(30 - 10\right)\right) = 4,85 \ Ом.$$

Приклад 7. Під час перемотування реостата з опором R = 150 *Ом* замість ніхромового проводу використали нікелевий такої ж довжини та перерізу. Обчислити опір реостата після перемотування.

Розв'язок. Визначаємо відношення довжини ніхромового проводу до його перерізу: $\frac{l}{S}=\frac{R}{\rho}=\frac{150}{0,91}=164,84\ \frac{м}{мм^2}$. Питомий опір ніхрому – $0,91\ \frac{Ом\cdot мм^2}{м}$. Питомий опір нікелю – $0,332\ \frac{Ом\cdot мм^2}{м}$. Оскільки для перемотування реостату використали нікелевий провід такої ж довжини та перерізу, то опір реостата залежатиме від питомого опору й дорівнює $R'=\rho'\frac{l}{S}=0,332\cdot 164,84=54,73\ Ом$.

Приклад 8. Електричний тен, опір якого R = 120 *Ом*, увімкнено до джерела енергії з напругою U = 230 *В*. Визначити потужність, яку споживає тен.

Розв'язок. Струм у тені рівний: $I=\frac{U}{R}=\frac{230}{120}=1,917\ А$. Потужність, яку споживає тен дорівнює:

$$P=RI^2=120\cdot 1,917^2=441\ Вт.$$

Задачі для самостійного розв'язування

Задача 1. Електричне поле з напруженістю E = 0,8 *В/м* діє на заряд з силою F = 9,6· 10^{-4} *Н*. Визначити величину цього заряду. ***Відповідь: $12\cdot 10^{-4}$ Кл.***

Задача 2. Визначити силу, з якою діє електричне поле напруженістю E = 1,4 *В/м* на заряд Q = $4\cdot 10^{-6}$ *Кл*.
Відповідь: $5,6\cdot 10^{-6}$ Н.

Задача 3. Визначити заряд, який перемістили в точку поля з потенціалом φ = 10 *В*, якщо при цьому здійснюється робота A = 0,5 ·10^{-6} *Дж*. ***Відповідь: $0,5\cdot 10^{-7}$ Кл.***

Задача 4. Потенціал електричного поля $\varphi = 20$ *В*. Визначити роботу, яка виконується силами цього поля, при внесенні в нього заряду $Q = 5{,}5\ 10^{-4}$ *Кл*. ***Відповідь: 0,011 Дж***.

Задача 5. Напруженість електричного поля $E = 5\ 10^{-2}$ *В/м*. Визначити силу з якою діє поле на заряд $Q = 1{,}6 \cdot 10^{-3}$ *Кл* і роботу по переміщенні цього заряду в точку поля з потенціалом $\varphi = 45$ *В*. ***Відповідь: $7{,}2 \cdot 10^{-2}$ Дж, $8 \cdot 10^{-5}$ Н***.

Задача 6. Визначити різницю потенціалів між двома точками електричного поля, якщо при переміщенні заряду $Q = 0{,}5 \cdot 10^{-6}$ *Кл* здійснена робота $A = 18 \cdot 10^{-5}$ *Дж*.
Відповідь: 50 В.

Задача 7. Напруга між точками 1 і 2 дорівнює 24 *В*. Обчислити потенціал точки 1, якщо потенціал точки 2 $\varphi_2 = 4$ *В*.
Відповідь: 28 В.

Задача 8. Визначити потенціал точки *a*, якщо потенціал точки *b* $\varphi = -5$ *В*, а напруга між точками дорівнює $U_{ab} = 30$ *В*.
Відповідь: 25 В.

Задача 9. В електричному полі між точками 1 і 2 в напрямі вектора його напруженості рухається електричний заряд $Q = 0{,}02$ *Кл*. Знайти потенціал точки 1, якщо потенціал точки 2 становить 50000 *В*, а робота виконувана при переміщенні заряду між цими точкам, дорівнює 3000 *Дж*.
Відповідь: 80000 В.

Задача 10. На ділянці електричного кола між точками *а* і *в* за певний час пройшов заряд величиною 50 *Кл*. Визначити роботу сил електричного поля за цей час, якщо напруга між точками *а* і *b* $U = 40$ *В*. ***Відповідь: 2000 Дж***.

Задача 11. Визначити різницю потенціалів між двома точками електричного поля, якщо при переміщенні заряду $Q = 0{,}5 \cdot 10^{-6}$ *Кл* здійснена робота $A = 18 \cdot 10^{-5}$ *Дж*.
Відповідь: 360 Дж.

Задача 12. В провідному середовищі через поперечний переріз $S = 2$ *мм*^{2} за одну хвилину пройшла кількість зарядів $Q = 18$ *Кл*. Обчислити силу електричного струму та його густину. ***Відповідь: 300 мА; 0,15 А/мм^2.***

Задача 13. Через провідник за час 0,5 *год* проходить заряд *Q = 2700 Кл*. Визначити струм в електричному колі.
Відповідь: 1,5 А.

Задача 14. Визначити час проходження заряду $Q = 0{,}6$ *Кл* по провіднику при заданому значенні струму $I = 0{,}5$ *А*, $I = 0{,}03$ *А*, $I = 2$ *мА*, $I = 15$ *А*, $I = 50$ *мА*, $mI = 2$ *А*. ***Відповідь: 1,2 с.***

Задача 15. Через поперечний переріз провідника $S = 2{,}5$ *мм*^{2} за час 0,04 *сек* пройшов заряд $Q = 20 \cdot 10^{-3}$ *Кл*. Визначити густину струму в провіднику. ***Відповідь: 0,2 А/мм^2.***

Задача 16. Про провіднику з поперечним перерізом $S = 0{,}24$ *мм*^{2} проходить струм, густина якого рывна $J = 5$ *А/мм*^{2}. Визначити струм і заряд, які пройшли через провідник за час 0,005 *с*, 1 *с*, 100 *мкс*, 20 *мс*, 0,4 *с*, 5 *с*.
Відповідь: 1,2 А; 6·10^{-3} Кл.

Задача 17. Визначити опір провідника довжиною $l = 150$ *м* і діаметром $d = 0{,}2$ *мм*, виготовленого з константана, латуні, сталі, фехраля, платини, алюмінію. ***Відповідь: 2,3 кОм.***

Задача 18. Визначити довжину мідного ізольованого проводу, якщо його діаметр $d = 0{,}3$ *мм* , а опір $R = 82$ *Ом*.
Відповідь: 330 м.

Задача 19. Опір манганінового проводу при температурі 20 °*С* рівний R = 500 *Ом*, а при температурі 280 °*С* – R = 500,8 *Ом*. Визначити температурний коефіцієнт манганіну. ***Відповідь: $6 \cdot 10^{-6}$ °$С^{-1}$.***

Задача 20. Опір датчика, виготовленого з мідного дроту при температурі 20 °*С* рівний R = 25 *Ом*. Визначити вимірюваному ним температуру якщо опір датчика збільшився до 32,8 *Ом*. ***Відповідь: 98 °С.***

Задача 21. Визначити матеріал провідника, якщо його опір при температурі 20 °*С* дорівнює 400 *Ом*, а при температурі 75 °*С* рівний 503,2 *Ом*.

Задача 22. Опір проводу дорівнює R = 2,35 *Ом* при довжині l = 150 *м* і діаметрі d = 1,5 *мм*. Визначити матеріал проводу. ***Відповідь: Алюміній.***

Задача 23. Визначити довжину проводу діаметром d = 0,5 *мм* для нагрівального елемента при увімкненні його в мережу з напругою 220 *В* при струмі споживання I = 6,5 *А*. виготовленого з ніхрому, константану, сталі, фехраля, алюмінію, манганіну. Визначити густину струму.
Відповідь: 6 м, 13,84 м, 4,74 м, 229,4 м, 15,82 м; 33,12 А/мм^2; .

Задача 24. Визначити довжину мідного провідника, якщо при подачі на його кінці напруги U = 27 *В* струм дорівнював I = 5 *А*. Діаметр проводу d = 0,8 *мм*. Визначити густину струму. ***Відповідь: 150 м; 9,9 А/мм^2.***

Задача 25. Визначити довжину ніхромового проводу діаметром d = 0,1 *мм*, необхідного для виготовлення паяльника потужністю P = 80 *Вт* при напрузі U = 220 *В*.
Відповідь: 4,32 м.

Задача 26. Мідний провід діаметром d = 1,2 *мм* має довжину l = 120 *м*. Визначити опір при температурі 20 °*С* і при температурі 80 °*С*. ***Відповідь: 1,85 Ом, 2,29 Ом.***

Задача 27. Опір телефонної лінії, виконаної з мідного проводу перерізом 2,5 $мм^2$, дорівнює R = 12 *Ом*. Визначити довжину лінії. ***Відповідь: 1714,3 м.***

Задача 28. Для прокладання лінії зв'язку використали мідний провід довжиною 2,5 *км*. Визначити діаметр проводу, якщо його опір R = 18 *Ом*. ***Відповідь: 1,76 мм.***

Задача 29. При виготовленні спіралі опором R = 16 *Ом*, використали ніхромовий провід діаметром 2 *мм*. Обчислити довжину проводу. ***Відповідь: 160,65 м.***

Задача 30. Для заміни спіралі опором R = 16 *Ом*, виготовленої з ніхромого проводу поперечним перерізом 2,5 $мм^2$, використали нікелевий провід такого ж перерізу. Яка буде довжина проводу відносно ніхромового.
Відповідь: на 76,52 м більша.

Задача 31. Опір спіралі калорифера, виготовленої з ніхрому дорівнює 186 *Ом* при t = 20 °*С*. На скільки зміниться опір спіралі, якщо її температура зміниться до 100 °*С*? Температурний коефіцієнт опору ніхрому 0,0001 1/*К*.
Відповідь: збільшиться на 1,488 Ом.

Задача 32. Потужність електрочайника, ввімкнутого в мережу з напругою U = 120 *В,* дорівнює P = 15 *кВт*. Обчислити струм, який проходить через нагрівний елемент електрочайника. ***Відповідь: 12,5 А.***

Запитання для самоперевірки

1. Основні характеристики електричного поля.
2. Фізична суть електричної напруги.
3. Відмінність між потенціалом і напругою.
4.Відмінність між ЕРС та напругою.
5. Чим зумовлений електричний струм?
6. Одиниці вимірювання ЕРС, електричного потенціалу, напруги, струму, енергії, потужності.
7. Який параметр характеризує здатність середовища проводити електричний струм?
8. В чому полягає відмінність між електричною провідністю та електричним опором?
9. Вплив температури на величину електричного опору.
10. Визначення електричної потужності.

Розділ 2. Електричні кола постійного струму

Після вивчення даного розділу

Ви повинні знати:

1. Основні характеристики електричних кіл, джерел енергії та споживачів.
2. Основні закони електричних кіл (Ома, Кірхгофа).
3. Методи аналізу електричних кіл.
4. Особливості електричних кіл.

Ви повинні вміти:

1.Використовувати закони Кірхгофа для аналізу електричних кіл.

2.Визначати еквівалентний опір електричних кіл.

3.Розраховувати електричні кола методом еквівалентних перетворень.

Основні теоретичні відомості

Елементи електричного кола поділяють на ***активні*** (джерела енергії) та ***пасивні*** (споживачі енергії). Джерела енергії (джерела напруги) поділяються на ***реальні*** $\left(R_{вн} \neq 0\right)$ та ***ідеальні*** $\left(R_{вн} = 0\right)$.

Електричне коло характеризується наявністю вузлів і віток (гілок).

Вузол – це точка електричного кола, де сходяться три або більше вітки.

Вітка – це частина електричного кола між двома вузлами, по якій протікає один струм.

Закон Ома встановлює зв'язок між струмом елемента та напругою на цьому елементі:

$$I = \frac{U}{R}; \quad I = UG.$$

За **першим законом Кірхгофа** алгебраїчна сума струмів у вузлі кола дорівнює нулеві: $\sum_{k=1}^{n} I_k = 0$.

За **другим законом Кірхгофа** алгебраїчна сума ЕРС і напруг у замкненому контурі дорівнює нулеві: $\sum_{k=1}^{n} U_k,\ E_k = 0$. Іншими словами алгебраїчна сума спадів напруг на всіх елементах замкненого контура дорівнює алгебраїчній сумі електрорушійних сил, що діють в цьому контурі: $\sum_{k=1}^{n} E_k = \sum_{k=1}^{n} R_k I_k$.

Основними **типами з'єднання** елементів у електричних колах є **послідовне** (рис. 1, для всіх елементів однаковим є струм), **паралельне** (рис. 2 – однаковою є напруга).

При послідовному з'єднанні елементів еквівалентний опір дорівнює алгебраїчній сумі їх опорів:

$$R_E = R_1 + R_2 + \cdots R_n = \sum_{k=1}^{n} R_k \ .$$

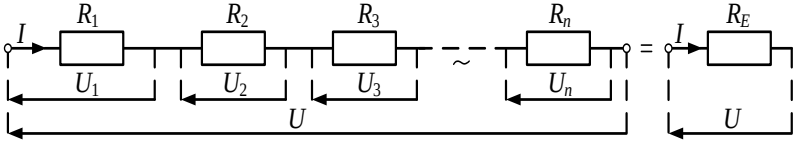


Рис.1. Послідовне з'єднання резисторів та їх еквівалента схема

При паралельному з'єднанні еквівалентна провідність дорівнює сумі провідностей віток

$$G_E = G_1 + G_2 + \cdots G_n = \sum_{k=1}^{n} G_k \ , \text{ або}$$

$$\frac{1}{R_E} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \cdots \frac{1}{R_n} = \sum_{k=1}^{n} \frac{1}{R_k} \ .$$

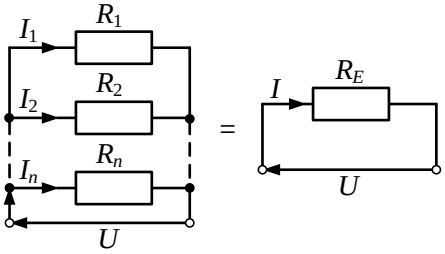


Рис.2. Паралельне з'єднання резисторів та їх еквівалентна схема

Метод перетворення полягає в знаходженні еквівалентного опору схеми шляхом еквівалентування опорів при послідовному та паралельному з'єднанні (згортання схеми) та знаходження струмів у кожній вітці (розгортання схеми).

Використовуючи закони Кірхгофа і Ома, можна розрахувати практично будь-яке коло. Як правило, бувають задані: схеми з'єднання, а також чисельні значення і напрямки джерел ЕРС, чисельні значення опорів резисторів. Необхідно розрахувати струми всіх віток, а за струмами легко розраховуються потужність, падіння напруги та ін.

Розв'язуючи задачу за законами Кірхгофа, спочатку потрібно визначити кількість рівнянь, які необхідно записати за 1-м та за 2-м законами Кірхгофа.

Якщо схема містить n вузлів і m віток, то слід за обома законами Кірхгофа скласти m незалежних рівнянь, тобто таких які не повторюються:

- за першим законом – на одиницю менше від кількості вузлів, тобто $k_I = n-1$;
- за другим законом стільки, скільки є незалежних контурів, тобто $k_{II} = n - k_I = m-(n-1) = m-n+1$.

При записі рівнянь за 1-м законом Кірхгофа слід дотримуватись правила знаків: струми, які входять у вузол, записуються зі знаком «плюс», а ті, які виходять із вузла – зі знаком «мінус».

Для складання рівнянь за 2-м законом Кірхгофа необхідно вибрати контури та напрямки обходу контурів, бажано ці напрямки обирати в один бік, наприклад, за годинниковою стрілкою. При записі рівнянь за 2-м законом Кірхгофа слід дотримуватись правил знаків: з «плюсом» записуємо ті ЕРС, напрям яких співпадає з обраним напрямом обходу контуру (зустрічні – зі знаком «мінус»), падіння напруги на резисторі записується з плюсом, якщо співпадають напрямки струму в даній вітці і напрямок обходу контуру.

Розв'язуючи сумісно систему рівнянь розраховуємо невідомі струми. Якщо, струм у якійсь вітці отримано зі знаком «мінус», це означає, що ми помилились у напрямку струму і його необхідно направити у протилежну сторону.

Незалежний контур – це контур у який входить хоча б одна нова вітка.

В електричному колі завжди має місце **баланс потужностей** –потужність енергії, що виробляється одночасно, дорівнює потужності, що споживається:

$$\sum_{k=1}^{n} P_{дж} = \sum_{k=1}^{n} P_{спож}, \quad \sum_{k=1}^{n} E_k I_k = \sum_{k=1}^{n} R_k I_k^2,$$

де $\sum_{k=1}^{n} E_k I_k$ – потужність генератора (джерела електроенергії) k-тої вітки; $\sum_{k=1}^{n} R_k I_k^2$ – потужність, яка виділяється в опорі R_k k-тої вітки.

Якщо $E_k I_k > 0$, то відповідні джерела працюють в режимі генератора, а якщо $E_k I_k < 0$ – то в режимі споживачів електричної енергії.

Якщо в колі є декілька джерел ЕРС, то може бути, що деякі із цих джерел працюватимуть у режимі споживачів і тоді ці джерела увійдуть в рівняння зі знаком «мінус».

Режим роботи джерела визначається за правилом: джерело працює в режимі джерела і добуток EI береться з

«плюсом», якщо напрямок ЕРС і напрямок діючого струму в даній вітці співпадають. Якщо ж ЕРС та струм зустрічні, це означає, що добуток EI цього джерела в балансі $P_{дж}$ слід брати з «мінусом». Важливо після закінчення розрахунків і перед перевіркою правильністю виконаних розрахунків на схемі поміняти на зворотні напрямки струмів в тих вітках, де вони отримані з «мінусом».

Приклади розв'язування задач

Приклад 1. До джерела енергії з ЕРС E = 120 *В* і внутрішнім опором $R_{вн}$ = 1,5 *Ом* під'єднали навантаження з опором R = 18,5 *Ом*. Обчислити напругу на клемах джерела.

Розв'язок: Струм у колі відповідно до закону Ома для повного кола**:** $I = \dfrac{E}{R_0 + R} = \dfrac{120}{1,5+18,5} = 6\ A.$ тоді напруга на клемах джерела дорівнює: $U = IR = 6 \cdot 18,5 = 111\ B$.

Приклад 2. Три споживачі електричної енергії з опорами відповідно R_1 = 4,5 *Ом*, R_2 = 3,8 *Ом*, R_3 = 6,7 *Ом* ввімкнули послідовно до джерела енергії. Обчислити еквівалентний опір зовнішньої частини електричного кола.

Розв'язок: Оскільки елементи з'єднані послідовно, то еквівалентний опір дорівнює:

$$R_E = R_1 + R_2 + R_3 = 4,5 + 3,8 + 6,7 = 15\ Ом\ .$$

Приклад 3. Три споживачі електричної енергії з опорами відповідно R_1 = 4 *Ом*, R_2 = 8 *Ом*, R_3 = 5 *Ом* під'єднані паралельно до джерела енергії. Обчислити сумарний опір споживача.

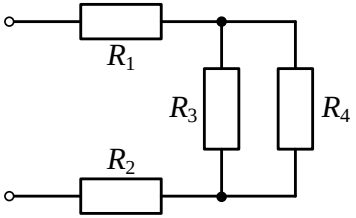
Розв'язок: Оскільки опори з'єднані паралельно, то еквівалентний опір визначаємо через провідність:

$$R_E = \frac{1}{G_E} \quad \text{де} \quad G_E = G_1 + G_2 + G_8;$$

$$G_E = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} = \frac{1}{4} + \frac{1}{8} + \frac{1}{5} = 0,575 \ \frac{1}{Ом}.$$

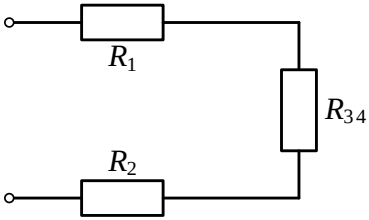
Звідки $R_E = \frac{1}{G_E} = \frac{1}{0,575} = 1,74$ *Ом.*

Приклад 4. Споживачі електричної енергії ввімкнули до джерела енергії за поданою схемою, а їхні опори відповідно дорівнюють R_1 = 2,6 *Ом*, R_2 = 7,4 *Ом*, R_3 = 6 *Ом*, R_4 = 4 *Ом*. Обчислити еквівалентний опір кола.



Розв'язок: Споживачі з'єднані змішано, елементи з опорами R_3 і R_4 з'єднані паралельно. Обчислимо їх еквівалентний опір $\frac{1}{R_{34}} = \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4}$, звідки $R_{34} = \frac{R_3 \cdot R_4}{R_3 + R_4} = \frac{6 \cdot 4}{6 + 4} = 2,4$ *Ом.*

Після цього отримаємо наступну схему:



в якій всі елементи з'єднані послідовно. Отже, еквівалентний опір кола рівний:

$$R_E = R_1 + R_2 + R_{34} = 2,6 + 7,4 + 2,4 = 12,4 \ Ом.$$

Приклад 5. До джерела з напругою U = 150 *В* увімкнено навантаження з чотирьох паралельних віток. Потужність, яку споживає кожна вітка рівна P_1 = 90 *Вт*, P_2 = 270 *Вт*, P_3 = 157,5 *Вт*, P_4 = 360 *Вт*. Визначити провідність кожної вітки, загальну провідність, еквівалентний опір навантаження і струм у нерозгалуженій ділянці кола.

Розв'язок. Знаючи потужність і струм кожної гілки, при заданій вхідній напрузі можна записати $P = UI = RI^2 = \frac{U^2}{R} = U^2 G$. Струм в кожній паралельній вітці рівний: $I = UG$. Тоді

$$G_1 = \frac{P_1}{U^2} = \frac{90}{150^2} = 4 \cdot 10^{-3} \ \ Ом^{-1},$$

$$G_2 = \frac{P_2}{U^2} = \frac{270}{150^2} = 12 \cdot 10^{-3} \ \ Ом^{-1},$$

$$G_3 = \frac{P_3}{U^2} = \frac{157,5}{150^2} = 7 \cdot 10^{-3} \ \ Ом^{-1},$$

$$G_4 = \frac{P_4}{U^2} = \frac{360}{150^2} = 16 \cdot 10^{-3} \ \ Ом^{-1}.$$

Еквівалентна провідність навантаження:

$$G_E = G_1 + G_2 + G_3 + G_4 = 4 \cdot 10^{-3} + 12 \cdot 10^{-3} + 7 \cdot 10^{-3} + 16 \cdot 10^{-3} =$$

$$= 39 \cdot 10^{-3} \ \ Ом^{-1}.$$

Еквівалентний опір навантаження:

$$R_E = \frac{1}{G_E} = \frac{1}{39 \cdot 10^{-3}} = 25,6 \ Ом.$$

Тоді струм у вітках визначимо за формулами:

$$I_1 = UG_1 = 150 \cdot 4 \cdot 10^{-3} = 0,6 \ A,$$

$$I_2 = UG_2 = 150 \cdot 12 \cdot 10^{-3} = 1,8 \ A,$$

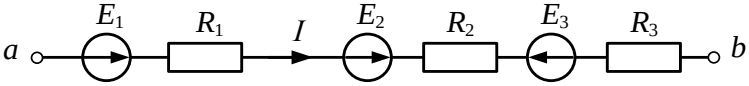
$$I_3 = UG_3 = 150 \cdot 7 \cdot 10^{-3} = 1,05 \ A,$$

$$I_4 = UG_4 = 150 \cdot 16 \cdot 10^{-3} = 2,4\ A.$$

Струм у нерозгалуженій частині кола рівний $I = UG_E = 150 \cdot 39 \cdot 10^{-3} = 5,85\ A.$ або за першим законом Кірхгофа:

$$I = I_1 + I_2 + I_3 + I_4 = 0,6 + 1,8 + 1,05 + 2,4 = 5,85\ A.$$

Приклад 6. Розрахувати струм у вітці «*ab*» і перевірити баланс потужностей для електричного кола, зображеного на рисунку, якщо E_1= 50 *В*, E_2= 60 *В*, E_3 = 20 *В*, φ_a = 40 *В*, φ_a = 30 *В*, R_1= 100 *Ом*, R_2= 80 *Ом*, R_3= 70 *Ом*.



Розв'язок: Приймемо умовно додатнім напрямок струму від вузла *a* до вузла *b*. Відповідно до закону Ома для активної вітки струм дорівнює:

$$I = \frac{U_{ab} \pm \sum E}{R_{ab}} = \frac{(\varphi_a - \varphi_b) + E_1 + E_2 - E_3}{R_1 + R_2 + R_3} =$$

$$= \frac{40 - 30 + 50 + 60 - 20}{100 + 80 + 70} = 0,4\ A.$$

Запишемо рівняння балансу потужностей:

$$\sum_{k=1}^{n} P_{джс} = \sum_{k=1}^{n} P_{спож}, \quad \text{де} \quad \sum_{k=1}^{n} P_{джс} = U_{ab} I + E_1 I + E_2 I - E_3 I =$$

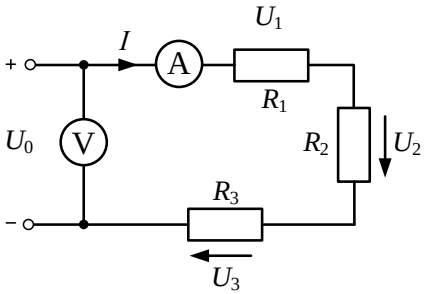
$$= (U_{ab} + E_1 + E_2 - E_3) I = (10 + 50 + 60 - 20) \cdot 0,4 = 40\ Вт,$$

$$\sum_{k=1}^{n} P_{спож} = I^2 \cdot R_1 + I^2 \cdot R_2 + I^2 \cdot R_3 =$$

$$= I^2 \cdot (R_1 + R_2 + R_3) = 0,4^2 (100 + 80 + 70) = 40\ Вт.$$

Приклад 7. Розрахувати струм у колі, перевірити другий закон Кірхгофа і перевірити баланс потужностей для елек-

тричного кола, зображеного на рисунку, якщо U_0 = 100 *В*, R_1 = 100 *Ом*, R_2 = 30 *Ом*, R_3 = 70 *Ом*.



Розв'язок: Відповідно до закону Ома струм у колі рівний:

$I = \dfrac{U_0}{R_{вх}}$, де $R_{вх} = R_1 + R_2 + R_3 = 100 + 30 + 70 = 200$ *Ом*; тоді струм $I = \dfrac{100}{200} = 0,5$ *А*.

За другим законом Кірхгофа напруга рівна:

$$U_0 = U_1 + U_2 + U_3 = I \cdot R_1 + I \cdot R_2 + I^2 \cdot R_3 = I \cdot \left(R_1 + R_2 + R_3\right) =$$
$$= 0,5\left(100 + 30 + 70\right) = 100 \text{ } B.$$

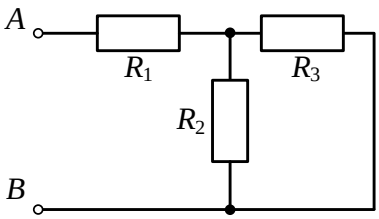
Запишемо рівняння балансу потужностей:

$$\sum_{k=1}^{n} P_{дж} = \sum_{k=1}^{n} P_{спож}, \quad \text{де} \quad \sum_{k=1}^{n} P_{дж} = U_0 I = 100 \cdot 0,5 = 50 \text{ } Вт,$$

$$\sum_{k=1}^{n} P_{спож} = I^2 \cdot R_1 + I^2 \cdot R_2 + I^2 \cdot R_3 = I^2 \cdot \left(R_1 + R_2 + R_3\right) =$$
$$= 0,5^2 \left(100 + 30 + 70\right) = 50 \text{ } Вт.$$

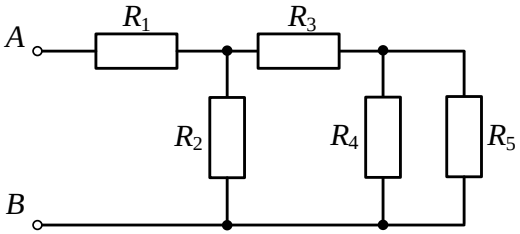
Задачі для самостійного розв'язування

Задача 1. Визначити еквівалентний опір на затискачах АВ схеми зображеної на рисунку, якщо R_1 = 0,5 *Ом*, R_2 = 5 *Ом*, R_3 = 9 *Ом*.



Відповідь: 3,7 Ом.

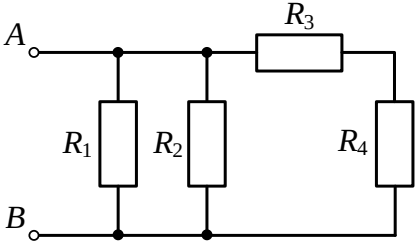
Задача 2. Визначити еквівалентний опір електричного кола зображеного на рисунку, якщо R_1 = 2,5 *Ом*, R_2 = 6 *Ом*, R_3 = 2 *Ом*, R_4 = 1,5 *Ом*, R_5 = 3 *Ом*.



Відповідь: 4,5 Ом.

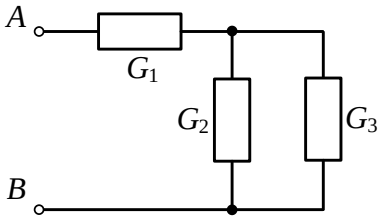
Задача 3. Задано провідності чотирьох паралельних віток G_1 = 0,11 *Ом*$^{-1}$, G_2 = 0,03 *Ом*$^{-1}$, G_3 = 0,07 *Ом*$^{-1}$, G_4 = 0,04 *Ом*$^{-1}$. Визначити еквівалентну провідність і еквівалентний опір кола. ***Відповідь: 0,25 Ом*$^{-1}$, *4 Ом***.

Задача 4. Для електричного кола, зображеного на рисунку, визначити загальну провідність кола, якщо R_1 = 25 *Ом*, R_2 = 50 *Ом*, R_3 = 40 *Ом*, R_4 = 60 *Ом*.



***Відповідь: 0,07 Ом*$^{-1}$**.

Задача 5. В поданій схемі задано значення еквівалентної провідності кола G = 0,025 $Ом^{-1}$. Визначити провідність G_1, якщо G_2 = 0,01 $Ом^{-1}$, G_3 = 0,04 $Ом^{-1}$.



Відповідь: 0,05 Ом$^{-1}$.

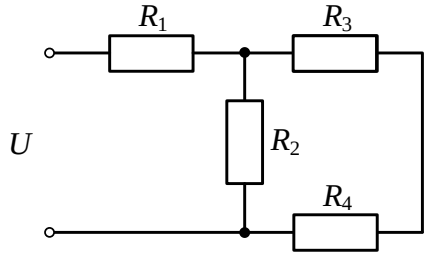
Задача 6. До джерела постійного струму з ЕРС E = 125 $В$ увімкнені послідовно три резистори з опорами R_1 = 100 $Ом$, R_2 = 30 $Ом$, R_3 = 120 $Ом$. Визначити струм в колі, спад напруги і потужність на кожному резисторі. Внутрішнім опором джерела знехтувати.

Відповідь: 0,5 А, 50 В, 15 В, 60 В, 25 Вт, 5 Вт, 30 Вт.

Задача 7. Резистори R_1, R_2 , R_3, з'єднані послідовно і до них підведена напруга U = 24 $В$. На резисторі R_1 = 8 $Ом$ виділяється потужність P = 4,5 $Вт$. Визначити опір резисторів R_2, R_3 і спад напруги на кожному з них, якщо R_1 = 0,5 R_2 .
Відповідь: 16 Ом, 8 Ом, 6В, 12В.

Задача 8. До джерела з напругою U = 300 $В$ увімкнені паралельно чотири лампи розжарювання з опорами R_1 = R_2 = 1200 $Ом$, R_3 = 500 $Ом$, R_4 = 750 $Ом$. Визначити загальний опір і провідність кола, струми в лампах і загальну потужність, яку вони споживають.
Відповідь: 200 Ом$^{-1}$, 5·10^{-3} Ом$^{-1}$, 25А, 0,6 А, 0,4 А, 450 Вт.

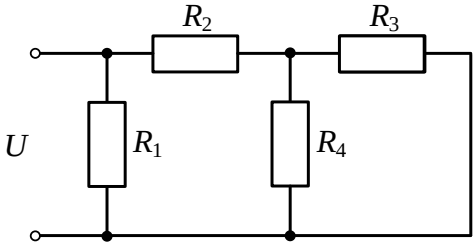
Задача 9. На вхід зображеного кола подана наруга U = 27 $В$. Визначити струми на всіх ділянках кола і потужність, яку споживає коло, якщо R_1 = 40 $Ом$, R_2 = 75 $Ом$, R_3 = 70 $Ом$, R_4 = 80 $Ом$.



Відповідь: 0,3 А, 0,2 А, 0,1 А, 8,1 Вт.

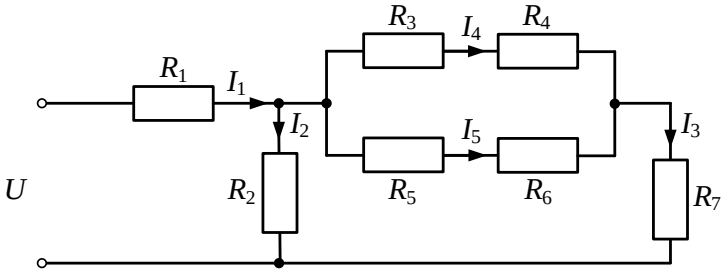
Задача 10. Визначити опір ламп розжарювання якщо їх потужність P = 25 *Вт*, P = 40 *Вт*, P = 60 *Вт*, P = 100 *Вт*, P = 150 *Вт* P = 500 *Вт*, і напруга U = 220 *В*.
Відповідь: 1936 Ом, 1210 Ом, 8070 Ом, 484 Ом, 324 Ом, 970 Ом.

Задача 11. Для поданої електричної схеми задані значення опорів резисторів $R_1 = R_2$ = 25 *Ом*, R_3 = 15 *Ом*, R_4 = 75 *Ом* і вхідна напруга U = 105 *В*. Визначити провідності і струми у вітках, спад напруг на всіх ділянках кола і споживану потужність.



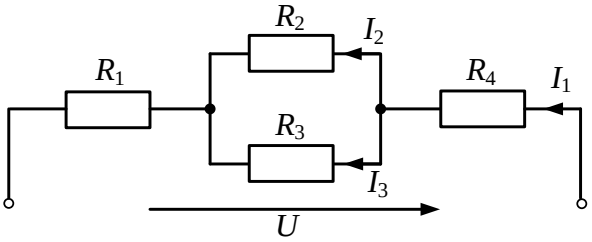
Відповідь: 7 А, 4,2 А, 2,8 А, 2,34 А, 0,46 А, 105 В, 35 А, 735 Вт.

Задача 12. В поданій електричній схемі опори резисторів рівні R_1 = 30 *Ом*, R_2 = 90 *Ом*, $R_3 = R_6$ = 100 *Ом*, $R_4 = R_5$ = 160 *Ом*, R_7 = 50 *Ом*. Визначити еквівалентний опір, напругу на вході і струми у вітках, якщо I_4 = 0,05 *А*.



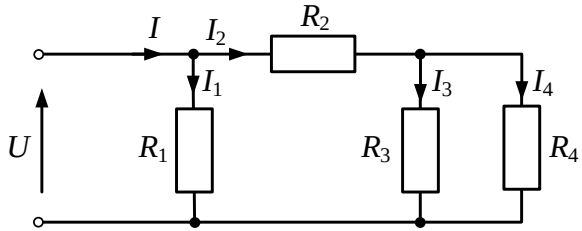
Відповідь: 0,2А, 0,1А, 0,05 А, 27 В, 90 Ом, 0,3 А.

Задача 13. Визначити струм I_3 та споживану зображеним електричним колом потужність, якщо: U= 50 *В*, $R_1 = R_2 =$ 5 *Ом*, $R_3 = R_4 =$ 10 *Ом*.



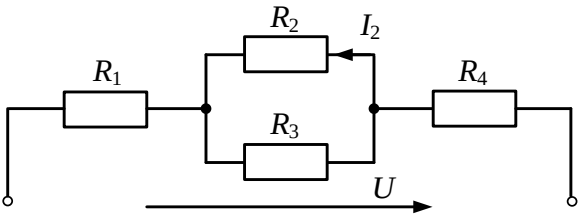
Відповідь: 2,5 А, 750 Вт.

Задача 14. При заданому струмі $I_4 = 2$ *А* визначити напругу U та споживану зображеним електричним колом потужність, якщо $R_1 = R_2 = R_3 =$ 10 *Ом*, $R_4 = R_5 =$ 5 *Ом*.



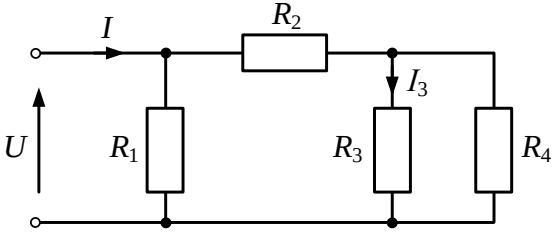
Відповідь: 140 В, 1260 Вт.

Задача 15. Визначити струм I_2 та споживану зображеним електричним колом потужність, якщо: U = 60 *В*, R_1 = 10 *Ом*, R_2 = 3 *Ом*, R_3 = 6 *Ом*, R_4 = 8 *Ом*.



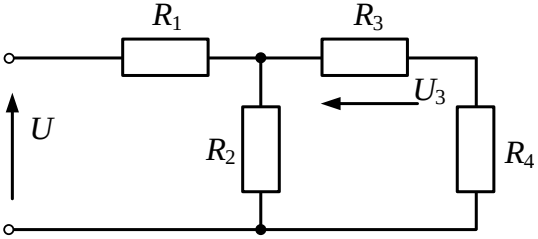
Відповідь: 1 А, 180 Вт.

Задача 16. При заданому струмі I_3 = 2 *А* визначити вхідну напругу U та споживану зображеним електричним колом потужність, якщо $R_1 = R_2$ = 8 *Ом*, $R_3 = R_4$ = 5 *Ом*.



Відповідь: 42 В, 388,5 Вт.

Задача 17. При заданій напрузі U_3 = 10 *В* визначити вхідну напругу U та споживану зображеним електричним колом потужність якщо: R_1 = 2 *Ом*, R_2 = 5 *Ом*, $R_3 = R_4$ = 2 *Ом*.

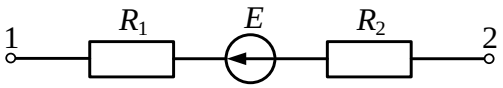


Відповідь: 38 В, 342 Вт.

Задача 18. До нагрівального елементу прикладено напругу U = 120 *В*, а споживаний струм I = 2,5 *А*. Визначити опір нагрівального елемента. ***Відповідь***: ***48 Ом***.

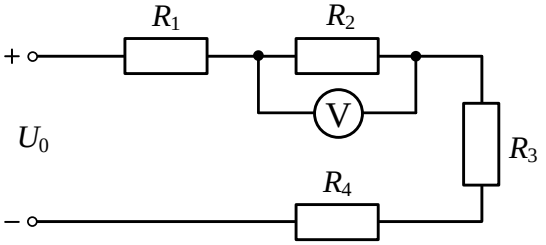
Задача 19. При послідовному з'єднанні двох резисторів їх еквівалентний опір дорівнює 40 *Ом*, а при паралельному з єднанні – 7,5 *Ом*. Визначити опір кожного з резисторів. ***Відповідь***: ***30 і 10 Ом***.

Задача 20. Розрахувати струм у вітці і перевірити баланс потужностей для електричного кола, зображеного на рисунку, якщо $\varphi_1 = 10$ *В* $\varphi_2 = 6$ *В*, E_1 = 16 *В*, R_1 = 15 *Ом*, R_2 = 9 *Ом*.



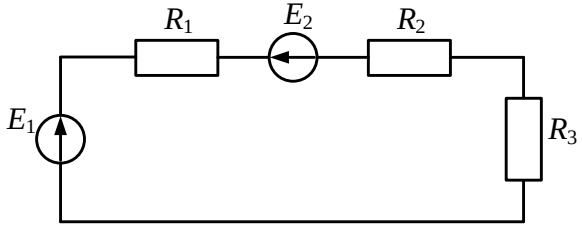
Відповідь: 0,5 А, 6 Вт.

Задача 21. Розрахувати струм у колі, зображеному на рисунку і визначити напругу джерела U_0, якщо U_2 = 30 *В*, R_1 = 10 *Ом*, R_2 = 20 *Ом*, R_3 = 40 *Ом*, R_4 = 40 *Ом*.



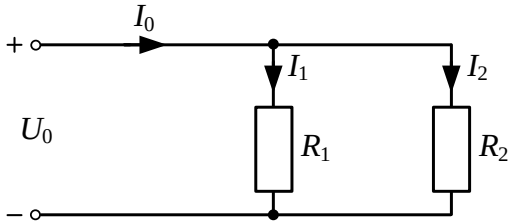
Відповідь: 150 В.

Задача 22. Розрахувати струм у колі зображеному на рисунку і вказати його напрямок, визначити режими роботи джерел, і перевірити баланс потужностей, якщо E_1 = 30 *В*, E_2 = 150 *В*, R_1 = 50 *Ом*, R_2 = 40 *Ом*, R_3 = 30 *Ом*.



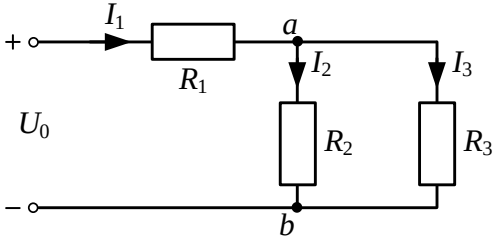
Відповідь: 1 А, 120 Вт.

Задача 23. Розрахувати всі струми у колі, зображеному на рисунку, перевірити перший закон Кірхгофа і баланс потужностей, якщо U_0 = 24 *В*, R_1 = 6 *Ом*, R_2 = 4 *Ом*.



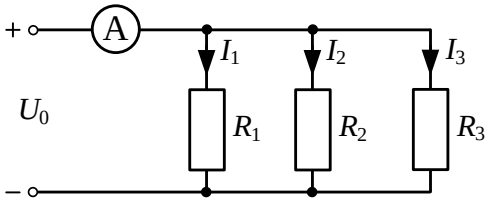
Відповідь: 10 А, 240 Вт.

Задача 24. Розрахувати всі струми у колі, зображеному на рисунку, перевірити перший та другий закони Кірхгофа, також баланс потужностей, якщо U_0 = 200 *В*, R_1 = 76 *Ом*, R_2 = 40 *Ом*, R_3 = 60 *Ом*.



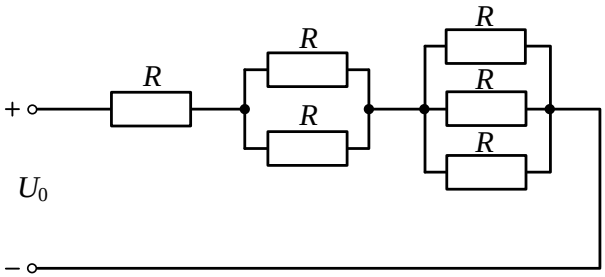
Відповідь: 2 А, 1,2 А, 200 В, 400 Вт.

Задача 25. Розрахувати покази амперметра в електричному колі, зображеному на рисунку, якщо U_0 = 20 *В*, R_1 = 20 *Ом*, R_2 = 40 *Ом*, R_3 = 13,3 *Ом*.



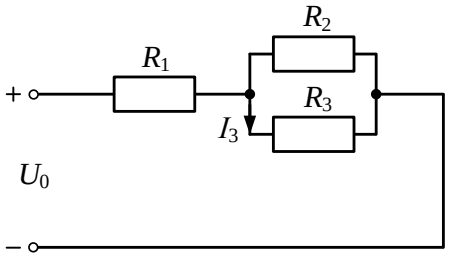
Відповідь: 3 А.

Задача 26. Розрахувати потужність джерела в електричному колі, зображеному на рисунку, якщо U_0 = 110 *В*, R = 30 *Ом*.



Відповідь: 220 Вт.

Задача 27. Розрахувати струм I_3 у колі, зображеному на рисунку, визначити потужність джерела для електричного кола, якщо U_0 = 134 *В*, R_1 = 40 *Ом*, R_2 = 50 *Ом*, R_3 = 60 *Ом*.



Відповідь: 0,91 А, 269 Вт.

Запитання для самоперевірки

1. З яких елементів складається електричне коло?
2. Як визначається режим джерела енергії?
3. Перший закон Кірхгофа.
4. Другий закон Кірхгофа.
5. Типи з’єднань в електричних колах.
6. Особливості послідовного та паралельного з’єднання.
7. Основні методи аналізу електричних кіл.
8. Суть методу перетворення.
9. Як формується система рівнянь за законами Кірхгофа для аналізу електричного кола?
10. Суть балансу потужностей в електричному колі.

Розділ 3. Електричні кола синусоїдного струму

Після вивчення даного розділу

Ви повинні знати:

1. Основні характеристики синусоїдних періодичних величин.
2. Явища резонансу в колах змінного струму.

Ви повинні вміти:

1. Визначати діючі значення електротехнічних величин та будувати їхні часові залежності.
2. Використовувати закон Ома для аналізу кіл синусоїдного струму.
3. Визначати умови резонансу напруг і резонансу струмів.

Основні теоретичні відомості

Електричні кола, в яких значення та спрямування ЕРС, напруг і струмів періодично змінюються в часі за синусоїдним законом, називають ***колами синусоїдного струму*** чи просто ***колами змінного струму***.

Залежність величини від часу називається ***миттєвим значенням*** цієї величини. Відповідно для напруги та струму миттєві значення визначаються як:

$$u = U_m \sin\left(\omega t + \psi_u\right) \qquad i = I_m \sin\left(\omega t + \psi_i\right).$$

Кут зсуву фаз φ вказує як зміщується фаза напруги (струму) відносно струму (напруги): $\varphi = \psi_U - \psi_I$.

Час протягом, якого відбувається один цикл періодичного процесу, називається ***періодом T***, вимірюється в секундах [с].

Кількість періодів за одну секунду називають ***частотою f***: $f = \frac{1}{T}$. Одиниця вимірювання частоти – герц: 1 *Гц* = 1/с =1 c^{-1}.

Величину $\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$ називають ***кутовою частотою*** і вимірюють в $[рад/с]$ чи градусах електричних.

Величина $(\omega t + \psi)$ – це аргумент синуса, який називають ***фазою синусоїдної величини***, що визначає її значення в даний момент часу t, тут ψ – ***початкова фаза***, яка визначає значення синусоїдної величини в момент часу $t = 0$.

Найбільші значення синусоїдних величин називають ***максимальними***, чи ***амплітудними*** значеннями відповідно ЕРС, напруги та струму.

Еквівалентним за дією чи ***діючим (ефективним)*** значенням періодичного змінного струму називають струм, який виділяє в елементі з опором R, за період часу T таку саму кількість теплової енергії, що й постійний струм. Діючі значення синусоїдних величин струму, напруги й ЕРС дорівнюють:

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = 0{,}707U_m \quad I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 0{,}707I_m \quad E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = 0{,}707E_m$$

Шкали вимірювальних приладів змінного струму, як правило, проградуйовані в діючих значеннях струму й напруги.

Середні значення синусоїдних величин за період дорівнюють нулеві, тому в електротехніці використовують їх середні значення за півперіод

$$U_{сер} = \frac{2}{\pi}U_m, \quad I_{сер} = \frac{2}{\pi}I_m.$$

Сукупність двох і більше векторів називають ***векторною діаграмою***. Додавання векторів здійснюється за правилом паралелограма.

У колах змінного струму, в загальному випадку, доводиться мати справу з опорами: активним, індуктивним, ємнісним.

Резистор – це елемент, в якому відбувається необоротне перетворення електромагнітної енергії в інші види енергії (теплову, променеву, механічну, тощо), який характеризується активним (резистивним) опором *R*.

У колі синусоїдного струму з активним опором напруга і струм співпадають за фазою, рис. 3.

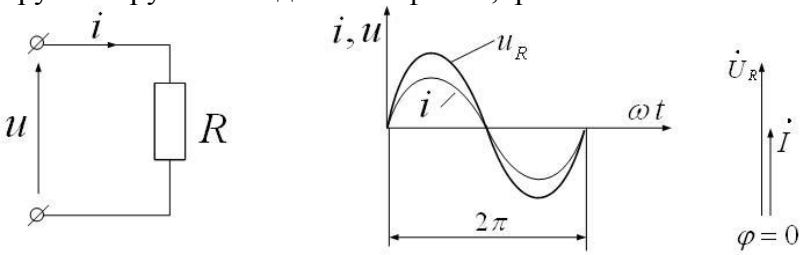


Рис.3. Резистор в колі синусоїдного струму, часові залежності, векторна діаграма

Електрична потужність у колі змінного струму з активним опором *R* розраховується за тими ж формулами, що і в колі постійного струму. Цю потужність називають ***активною потужністю*** кола змінного струму. Активна потужність витрачається на перетворення електричної потужності в тепло, світло, а також на перетворення в механічну потужність (обертання механізму, створення тягової сили електромагніту та ін.).

Котушка індуктивності – це елемент, який має властивість запасати енергію магнітного поля. ***Ідеальна котушка*** – це така котушка, резистивний опір якої дуже малий і ним можна знехтувати. В колі змінного струму опір індуктивності залежить від частоти струму $X_L = \omega L$. Величину X_L називають ***реактивним індуктивним опором***, $[X_L] = 1\,Ом$. Напруга на котушці випереджає за фазою струм на 90 º чи струм відстає від напруги на 90 º, рис. 4.

Кут зсуву фаз між напругою і струмом котушки індуктивності рівний: $\varphi = \psi_U - \psi_I = \frac{\pi}{2} - 0 = \frac{\pi}{2}$.

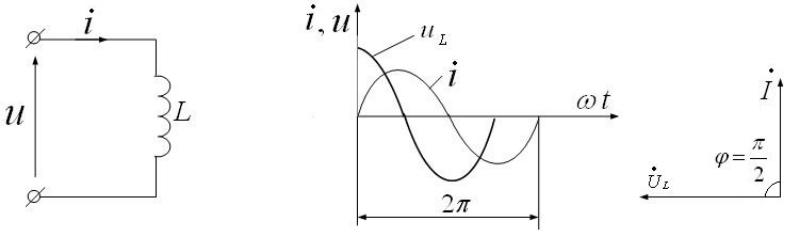


Рис. 4. Котушка індуктивності в колі синусоїдного струму, часові залежності, векторна діаграма

В колі з індуктивністю відбувається неперервний періодичний процес обміну енергією між електричною мережею (джерелом електроенергії) і магнітним полем індуктивності. Цю енергію називають ***реактивною енергією***, і відповідно потужність цієї енергії – ***реактивною потужністю Q***.

Конденсатор – це елемент, який запасає енергію електричного поля.

В колі змінного струму з конденсатором, на відміну від постійного, електричний струм проходить. Опір конденсатора струмові називається ***реактивним ємнісним опором*** і залежить від частоти струму $X_c = \frac{1}{\omega C}$. $[X_c] = 1\,Ом$.

Струм конденсатора випереджує за фазою напругу на 90 º, чи напруга відстає від струму на 90 º, рис. 5. Кут зсуву фаз між напругою і струмом конденсатора рівний:

$$\varphi = \psi_U - \psi_I = 0 - \frac{\pi}{2} = -\frac{\pi}{2}.$$

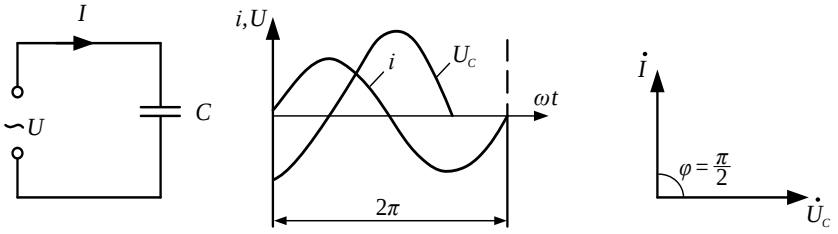


Рис.5. Конденсатор в колі синусоїдного струму, часові залежності, векторна діаграма

У колі з конденсатором відбувається неперервний періодичний обмін енергії між мережею та конденсатором. Потужність, що характеризує швидкість зміни цієї енергії, називається ***реактивною потужністю***.

Якщо в колі з послідовно з'єднаними активним опором *R*, індуктивністю *L* та ємністю *C* (рис. 6) проходить синусоїдальний струм, то діюче значення напруги, прикладеної до кола, рівне: $U = \sqrt{U_R{}^2 + \left(U_L - U_C\right)^2}$.

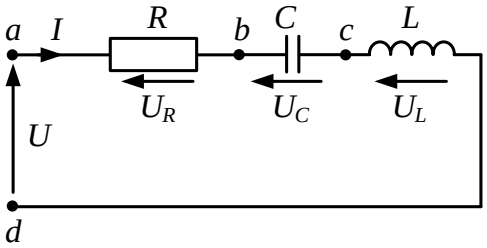


Рис.6. Послідовне з'єднання R, L, C

При змінному струмі вітка електричного кола характеризується ***повним опором*** вітки *Z*, який визначається через параметри елементів за виразом:

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(X_L - X_C\right)^2} = \sqrt{R^2 + X^2},$$

де R – активний опір вітки, $X = X_L - X_C$ – реактивний опір вітки.

Опори вітки утворюють ***трикутник опорів***, в якому катети відповідають реактивному та активному опорам, а гіпотенуза – повному опору. На рис. 7 зображена векторна діаграма напруг і струмів, а також трикутник опорів для цього кола.

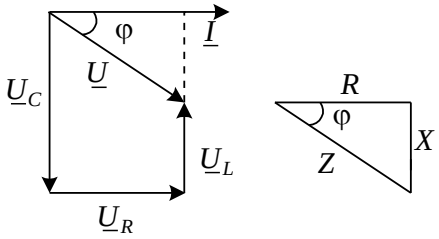


Рис.7. Векторна діаграма напруг та трикутник опорів

Кут зсуву фаз φ визначають за виразами:

$$\varphi = arctg\frac{X_L - X_C}{R} \quad \text{або} \quad \varphi = \arccos\frac{R}{Z}.$$

В колі з паралельно з'єднаними активним опором, індуктивністю та ємністю (рис. 8) напруги на кожній вітці схеми однакові й дорівнюють напрузі джерела енергії, а струм джерела дорівнює векторній сумі струмів віток.

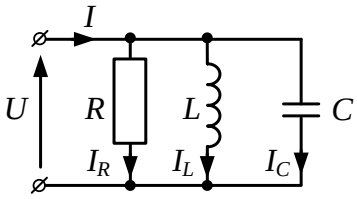


Рис.8. Паралельне з'єднання R, L, C

Діюче значення струму джерела рівне: $I = \sqrt{I_R{}^2 + \left(I_L - I_C\right)^2}$.

Провідність вітки $Y = \frac{1}{Z}$ містить активну провідність $G = \frac{R}{Z^2}$ і реактивну провідність $B = \frac{X}{Z^2}$, які разом утво-

рюють ***трикутник провідностей:*** $Y = \sqrt{G^2 + \left(B_L - B_C\right)^2} =$ $= \sqrt{G^2 + B^2}$, рис. 9. Тут $B = B_L - B_C$ – повна реактивна провідність.

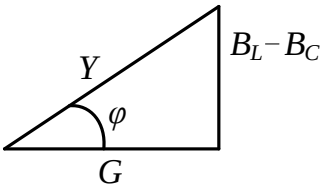


Рис. 9. Трикутник провідностей

В колі синусоїдного струму мають місце такі ***потужності:***

активна – $P = UI\cos\varphi = I^2 R$ $\left[Bm\right]$;

реактивна – $Q = UI\sin\varphi = I^2 X$ $\left[вар\right]$;

повна – $S = UI = I^2 Z$ $\left[BA\right]$.

Потужності кола пов'язані між собою співвідношенням $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$ і утворюють ***трикутник потужностей,*** рис.10.

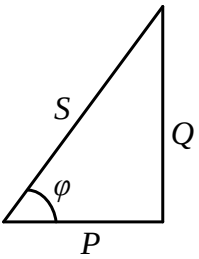


Рис.10.Трикутник потужностей

Важливою величиною є ***коефіцієнт потужності*** $\cos\varphi = \frac{P}{S} = \frac{R}{Z}$. Цей коефіцієнт вказує на ефективність

використання електричної енергії, яка підводиться до споживача.

Якщо в електричному колі чи ділянці кола, що має реактивні елементи, напруга і струм співпадають за фазою, то має місце ***явище резонансу.***

В колі чи ділянці електричного кола з послідовним з'єднанням котушки L та конденсатора C (рис. 6) за умови рівності їх опорів $X_L = X_C$ виникає явище ***резонансу напруг.*** Такі ділянки називаються ***коливальними контурами*** і характеризуються к***утовою резонансною частотою***, яка дорівнює $\omega_0 = 2\pi f = \frac{1}{\sqrt{LC}}$.

При наявності в колі резонансу напруг застосовують наступні співвідношення та формули:

характеристичний опір контуру – це опір кожного з реактивних елементів при резонансі $\rho = \omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C} = \sqrt{\frac{L}{C}}$;

добротність контуру $Q = \frac{\rho}{R}$;

загасання контуру $d = \frac{1}{Q}$.

Ознаки резонансу напруг у колі змінного струму наступні:

1. Повний опір кола мінімальний і дорівнює активному опору $Z = R$.
2. Струм у колі максимальний, тому що повний опір кола мінімальний і рівний $I_0 = \frac{U}{R}$.
3. Струм у колі збігається за фазою з напругою мережі.
4. Напруга на індуктивному опорі дорівнює напрузі на ємності: $U_{L0} = U_{C0} = I_0 \cdot \rho = U \cdot Q = \frac{U}{d}$.

5. Напруга мережі дорівнює активному спаду напруг $U = U_a$.

Векторну діаграму при резонансі напруг у колі показано на рис. 11.

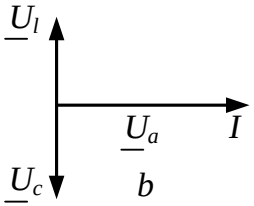


Рис.11. Векторна діаграма при резонансі напруг

Явище резонансу напруг небезпечне, бо може призвести до утворення на окремих ділянках кола напруг, які значно перевищують напругу мережі.

При паралельному з'єднанні котушки та конденсатора, за умови рівності їх реактивних провідностей $B_L = B_C$ виникає явище ***резонансу струмів***.

Умовою резонансу є рівність $B_1 = B_2$, або в розгорнутій формі: $\dfrac{\omega L}{R_1^2 + (\omega L)^2} = \dfrac{\dfrac{1}{\omega C}}{R_2^2 + \left(\dfrac{1}{\omega C}\right)^2}$ або $\dfrac{X_L}{Z_1^2} = \dfrac{X_C}{Z_2^2}$.

Кутова резонансна частота дорівнює

$$\omega_p = 2\pi f = \frac{1}{\sqrt{LC}} \sqrt{\frac{\rho^2 - R_1^2}{\rho^2 - R_2^2}},$$

де ρ – характеристичний опір контуру $\rho = \sqrt{\dfrac{L}{C}}$.

Опір паралельного контуру при резонансі:

$$Z_p = R_p = \frac{R_1 R_2 + \rho^2}{R_1 + R_2}.$$

Добротність контуру: $Q = \dfrac{\rho}{R_1 + R_2}$.

Струм в нерозгалуженій ділянці кола при резонансі:

$$I_p = \frac{U}{R_p} \quad \text{або} \quad I_p = \frac{U}{R_i + R_p},$$

де R_i – внутрішній опір джерела енергії.

Якщо коло без втрат, тобто $R_1 = R_2 = 0$, то умова резонансу запишеться наступним чином: $\dfrac{1}{\omega_p L} = \omega_p C$. ***Кутова резонансна частота*** визначається як: $\omega_p = \omega_0 = \dfrac{1}{\sqrt{LC}}$.

Опір контура при резонансі струмів: $Z_p \to \infty$.

Потужність, що виділяється в паралельному коливальному контурі при резонансі буде рівною:

$$P_p = U_p \cdot I_p = I_p^2 \cdot R_p = \frac{U_p^2}{R_R}.$$

Приклади розв'язування задач

Приклад 1. Визначити період коливань синусоїдного струму, якщо частота $f = 125$ *Гц.*

Розв'язок. Період коливань визначаємо за виразом:

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{25} = 0,008 \text{ с.}$$

Приклад 2. Миттєве значення струму і напруги дорівнюють $i = 18\sin(785t - 30^\circ)$ *A,* $u = 18\sin(785t)$ *B.* Визначити амплітудні та діючі значення струму та напруги, їх початкові фази.

Розв'язок. Амплітудне значення струму та напруги $I_m = 18\ A;\ \ U_m = 210\ B$ Діючі значення струму та напруги дорівнюють: $I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = \frac{18}{\sqrt{2}} = 12{,}9\ A;\ \ U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = \frac{210}{\sqrt{2}} = 149\ B.$

Початкова фаза струму $\psi_I = 30^\circ$, напруги $\psi_u = 0.$

Приклад 3. Напруга в нерозгалуженій частині кола змінного струму $u = 180\sin\left(\omega t + \frac{\pi}{4}\right) B$, струм – $i = 2{,}7\sin\left(\omega t - \frac{\pi}{6}\right) A.$ Визначити кут зсуву фаз між ними, їх діючі значення, миттєві значення для *t = 0* і побудувати векторну діаграму для *t = 0,* якщо *f = 20 Гц.*

Розв'язок. Кут зсуву фаз між напругою і струмом:

$$\varphi = \psi_U - \psi_I = \frac{\pi}{4} + \frac{\pi}{6} = \frac{5\pi}{12} = 75^\circ.$$

Діючі значення

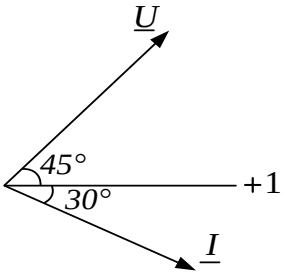
$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = \frac{180}{\sqrt{2}} = 1289\ B,\ \ I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = \frac{2{,}7}{\sqrt{2}} = 1{,}9\ A.$$

Миттєві значення струму і напруги для *t* = 0*:*

$$u = 180\sin 45^\circ = 180 \cdot 0{,}707 = 127 B.$$

$$i = -2{,}7\sin 30^\circ = -2{,}7 \cdot 0{,}5 = -1{,}35 A.$$

Векторна діаграма зображена на рисунку.



Приклад 4. Записати миттєве значення синусоїдної напруги, якщо її максимальне значення U_m = 150 *В,* період коливань T = 0,05 *с*, початкова фаза ψ_u = 30 °.

Розв'язок. Миттєве значення синусоїдної напруги має вигляд:

$$u = U_m \sin\left(\omega t + \psi_u\right) = U_m \sin\left(2\pi t/T + \psi_u\right) =$$

$$= 150\sin\left(2 \cdot 3{,}14t/0{,}05 + 30^\circ\right) = 150\sin\left(125{,}6t + 30^\circ\right).$$

Приклад 5. Струм у електричному колі змінюється за законом $i = 2\sin\left(314t + 30^\circ\right)$. Визначити показ амперметра електромагнітної системи.

Розв'язок. Оскільки задане миттєве значення струму, то визначаємо амплітудне значення струму: $I_m = 2$ *А*. Амперметр показує діюче значення струму, яке рівне

$$I_A = I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = \frac{2}{\sqrt{2}} = 1{,}4 \text{ А}.$$

Приклад 6. До джерела синусоїдної напруги $u = 110\sin\left(314t\right)$ увімкнено споживач з опором R = 10 *Ом*. Визначити покази амперметра в цьому колі та потужність, що споживається.

Розв'язок. Діюче значення напруги джерела дорівнює**:** $U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = \frac{110}{\sqrt{2}} = 77{,}78$ *В*. Амперметр показує діюче значення струму, яке визначається за законом Ома**:** $I = \frac{U}{R} = \frac{77{,}78}{10} = 7{,}778$ *А*. Потужність, яку споживає споживач з опором *R,* дорівнює: $P = I^2 R = 7{,}778^2 \cdot 10 = 605$ *Вт*.

Приклад 7. В електричному колі з котушкою індуктивності $L = 100$ *мГн* діє джерело напруги $u = 220\sin(100t)$. Визначити реактивний індуктивний опір котушки.

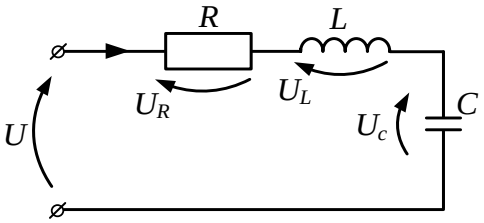
Розв'язок. Визначаємо реактивний індуктивний опір котушки: $X_L = \omega L = 100 \cdot 10^{-3} = 10$ *Ом*, де $\omega = 100$ c^{-1} – кутова частота, яка задана у виразі для миттєвого значення напруги.

Приклад 8. Визначити показ амперметра у вітці з конденсатором $C = 500$ *мкФ*, якщо до нього прикладено напругу $u = 120\sin(100t)$.

Розв'язок. Визначаємо реактивний ємнісний опір конденсатора: $X_c = \dfrac{1}{\omega C} = \dfrac{1}{100 \cdot 500 \cdot 10^{-6}} = 20$ *Ом*.

Приклад 9. До кола з послідовно з'єднаним активним опором $R = 3$ *Ом*, котушкою індуктивності $L = 80$ *мГн* та конденсатором $C = 15$ *мкФ*, під'єднано джерело напруги з частотою $f = 50$ *Гц*. Знайти струм, напругу на кожному елементі кола та потужність, що споживається цим колом. Побудувати векторну діаграму.

Розв'язок. Рисуємо електричне коло за даними умови задачі, та позначаємо струм і напруги на окремих елементах електричного кола, зображеного рисунку.



Визначаємо опори елементів електричного кола. Індуктивний опір:

$$X_L = \omega L = 2\pi fL = 2 \cdot 3{,}14 \cdot 50 \cdot 80 \cdot 10^{-3} = 25{,}2 \ Ом.$$

Ємнісний опір:

$$X_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2 \cdot 3{,}14 \cdot 50 \cdot 15 \cdot 10^{-6}} = 21{,}2 \ Ом.$$

Повний опір кола:

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(X_L - X_C\right)^2} = \sqrt{3^2 + \left(25{,}2 - 21{,}2\right)^2} = 5 \ Ом.$$

Знаючи повний опір кола, за законом Ома знаходимо струм в колі: $I = \frac{U}{Z} = \frac{20}{5} = 4 \ A$, який за фазою відстає від напруги на кут φ, тангенс якого рівний:

$$tg\varphi = \frac{X_L - X_C}{R} = \frac{25{,}2 - 21{,}2}{3} = 1{,}333, \qquad \varphi = 53^\circ 10'.$$

Обчислюємо напруги на активному опорі, індуктивності і ємності:

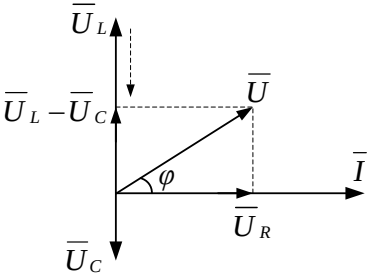
$$U_R = RI = 3 \cdot 4 = 12 \ B, \quad U_L = X_L I = 25{,}2 \cdot 4 = 101 \ B,$$

$$U_C = X_C I = 21{,}2 \cdot 4 = 85 \ B.$$

Коло споживає потужність:

$$P = UI \cos\varphi = 20 \cdot 4 \cdot \cos 53^\circ 10' = 48 \ Вт.$$

За знайденими даними будуємо векторну діаграму:



Приклад 10. В електричному колі з послідовно з'єднаними резистором та котушкою індуктивності діє

джерело з напругою 220 *В*. Визначити активну та реактивну потужності, що споживаються в цьому колі, якщо R = 10 *Ом*, L = 50 *мГн*, f = 50 *Гц*.

Розв'язок. Визначаємо реактивний індуктивний опір котушки: $X_L = \omega L = 2\pi fL = 2 \cdot 3{,}14 \cdot 50 \cdot 50 \cdot 10^{-3} = 15{,}7$ *Ом*.

Повний опір кола рівний:

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(X_L - X_C\right)^2} = \sqrt{10^2 + \left(15{,}7 - 0\right)^2} = 18{,}61 \text{ Ом}.$$

Діюче значення струму в колі: $I = \dfrac{U}{Z} = \dfrac{220}{18{,}61} = 11{,}82$ *А*.

Активна потужність, що споживається в цьому колі:

$$P = I^2 R = 10 \cdot 11{,}82^2 = 1397{,}12 \text{ Вт}.$$

Реактивна потужність, що споживається в цьому колі:

$$Q = I^2 X = 15{,}7 \cdot 11{,}82^2 = 2193{,}48 \text{ вар}.$$

Приклад 11. Визначити кут зсуву фаз і повний реактивний опір кола, якщо воно складено з послідовно з'єднаних резистора R = 12 *Ом* та котушки індуктивності. Напруга джерела U = 80 *В*, струм. що проходить в ньому I = 2,5 *А*.

Розв'язок. Визначаємо повний опір кола за законом Ома: $Z = \dfrac{U}{I} = \dfrac{80}{2{,}5} = 32$ *Ом*. З трикутника опорів:

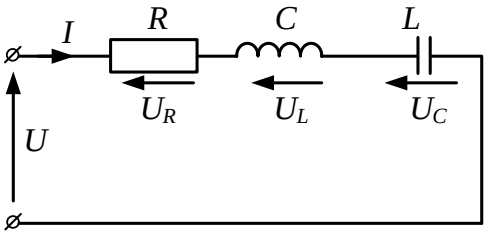
$$\cos\varphi = \frac{R}{Z} = \frac{12}{32} = 0{,}375, \text{ звідки } \varphi = 68^\circ.$$

Повний реактивний опір кола дорівнює:

$$X = Z\sin\varphi = Z\sqrt{1 - \cos^2\varphi} = 32\sqrt{1 - 0{,}375^2} = 29{,}7 \text{ Ом}.$$

Приклад 12. Електричне коло з послідовно з'єднаними резистора з опором R = 10 *Ом* , котушки з індуктивністю L = 50 *мГн* і конденсатора ємністю C = 1000 *мкФ*, увімкнено до електричної мережі синусоїдної напру-

ги з діючим значенням 220 *В* і частотою 50 *Гц*. Обчислити повний опір кола, коефіцієнт потужності, діюче значення струму, напруги на елементах кола, активну, реактивну та повну потужності.



Розв'язок. Визначаємо реактивний індуктивний опір котушки:

$$X_L = \omega L = 2\pi fL = 2 \cdot 3{,}14 \cdot 50 \cdot 50 \cdot 10^{-3} = 15{,}7 \text{ Ом}.$$

Реактивний ємнісний опір конденсатора:

$$X_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{3{,}14 \cdot 1000 \cdot 10^{-6}} = 3{,}18 \text{ Ом}.$$

Повний опір кола:

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(X_L - X_C\right)^2} = \sqrt{10^2 + \left(15{,}7 - 3{,}18\right)^2} = 16 \text{ Ом}.$$

Коефіцієнт потужності: $\cos\varphi = \frac{R}{Z} = \frac{10}{16} = 0{,}625, \quad \varphi = 51°20'.$

Діюче значення струму: $I = \frac{U}{Z} = \frac{220}{16} = 13{,}8 \text{ А}.$

Діючі значення напруг:

на резисторі $U_R = RI = 13{,}8 \cdot 10 = 138 \text{ В}$,

на котушці $U_L = X_L I = 13{,}8 \cdot 15{,}7 = 216 \text{ В}$,

н конденсаторі $U_C = X_C I = 13{,}8 \cdot 3{,}18 = 44 \text{ В}$.

Діюче значення прикладеної напруги:

$$U = \sqrt{U_R^2 + \left(U_L - U_C\right)^2} = \sqrt{138^2 + \left(216 - 44\right)^2} = 220 \text{ В}.$$

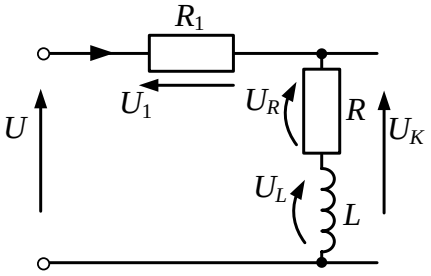
Визначаємо потужності:

активна $P = UI\cos\varphi = 220 \cdot 13{,}8 \cdot 0{,}625 = 1900\ Вт$;

реактивна $Q = UI\sin\varphi = 220 \cdot 13{,}8 \cdot 0{,}81 = 2380\ вар$;

повна $S = UI = 220 \cdot 13{,}8 = 3040\ ВА$.

Приклад 13. Послідовно з реостатом, що має активний опір R = 20 *Ом*, увімкнена котушка, параметри якої R = 6,7 *Ом*, L = 2,7 *мГн*. Визначити струм, що проходить в колі, зсув фаз між напругою та струмом, напругу на реостаті і котушці, а також зсув фаз між напругою джерела і напругою на котушці, якщо U = 220 *В*. Частота змінного струму f = 50 *Гц*. Обчислити активну, реактивну та повну потужності котушки. Побудувати векторну діаграму.



Розв'язок. Індуктивний опір котушки рівний: $X_к = \omega L = 2\pi fL = 2 \cdot 3{,}14 \cdot 50 \cdot 42{,}7 \cdot 10^{-3} = 13{,}4\ Ом$.

Повний опір котушки рівний:

$$Z_к = \sqrt{R^2 + X_к{}^2} = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} = \sqrt{6{,}7^2 + 13{,}4^2} = 15\ Ом.$$

$$Z_{екв} = \sqrt{(R_1 + R)^2 + X_2{}^2} = \sqrt{26{,}7^2 + 13{,}4^2} = 29{,}9\ Ом.$$

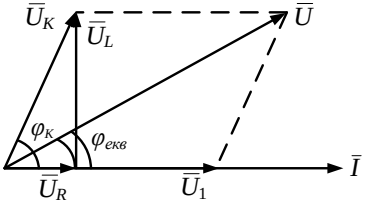
В колі протікає струм: $I = \dfrac{U}{Z_{екв}} = \dfrac{220}{29{,}9} = 7{,}35\ A.$

Зсув фаз між напругою і струмом визначаємо із співвідношення: $tg\varphi_{екв} = \dfrac{X_L}{R_1 + R} = \dfrac{13{,}4}{26{,}7} = 0{,}5;$ $\varphi_{екв} = 26^\circ 30'.$

Напруга на реостаті і котушці рівна:

$$U_1 = IR_1 = 7,35 \cdot 20 = 147\ B, \quad U_к = IZ_к = 7,35 \cdot 15 = 110\ B.$$

Будуємо векторну діаграму струму і напруг.



Зсув фаз між напругою джерела та напругою на котушці знайдемо як різницю фазових кутів:

$$tg\varphi_к = \frac{\omega L}{R} = \frac{13,4}{6,7} = 0,5; \qquad \varphi_к = 63^\circ 30'$$

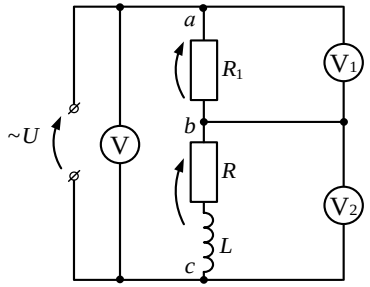
$$\varphi = \varphi_к - \varphi_{екв} = 63^\circ 30' - 26^\circ 30' = 37^\circ.$$

Активна потужність $P = I^2 R = 7,35^2 \cdot 6,7 = 362\ Вт$,

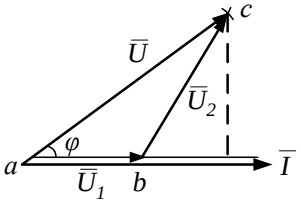
реактивна потужність $Q = I^2 X_L = 7,35^2 \cdot 13,7 = 724\ Вар$,

повна потужність котушки $S = U_k I = 110 \cdot 7,35 = 808\ ВА$.

Приклад 14. За показами трьох вольтметрів, увімкнених в коло, зображене на рисунку, визначити потужність, яку споживає індуктивна котушка з параметрами *R*, *L*, якщо R_1 = 20 *Ом*, а покази приладів дорівнюють відповідно *U* = 120 *В*, U_1 = 80 *В*, U_2 = 60 *В*. Вказівка: задачу простіше розв'язати, якщо спочатку побудувати векторну діаграму.



Розв'язок. Циркулем будуємо точку перетину $\bar{U}_к$ та $\bar{U}$.



$$U_1 = IR_1; \quad I = \frac{U_1}{R} = \frac{80}{20} = 4\ A.$$

За теоремою косинусів: $U_2^2 = U^2 + U_1^2 - 2UU_1 \cos\varphi$, звідки

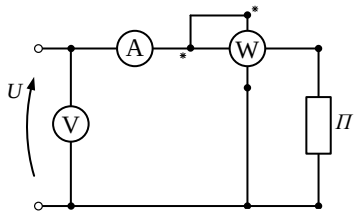
$$\cos\varphi = \frac{U^2 + U_1^2 - U_2^2}{2UU_1} = \frac{120^2 + 80^2 - 60}{2 \cdot 120 \cdot 80} = 0{,}896.$$

Потужність спожита котушкою:

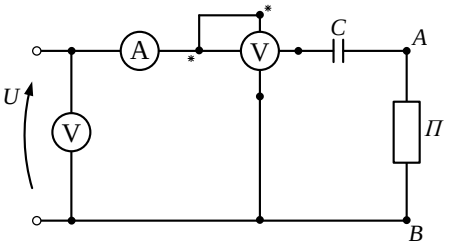
$$P_{екв} = P_1 + P_2 = I^2R_1 + I^2R = UI\cos\varphi = 120 \cdot 4 \cdot 0{,}896 = 430\ Вт$$

$$P_к = I^2R = P_{екв} - P_{R1} = 430 - I^2R_1 = 430 - 4^2 \cdot 20 = 110\ Вт.$$

Приклад 15. Для визначення параметрів еквівалентної схеми пасивного двополюсника АВ були виміряні напруги U = 26 *В*, струм I = 4 *А* і потужність P = 40 *Вт*. Для визначення еквівалентного реактивного опору цього двополюсника (L чи C), послідовно з ним увімкнули конденсатор. Прилади показали інші значення, а саме I = 5,53 *А*, P = 76,5 *Вт* при тому ж самому значенні прикладеної напруги U = 26 *В*. Проведіть аналіз отриманих результатів.



а)



б)

Розв'язок. Параметри еквівалентної схеми двополюсника (схема *а*):

$$R_{екв} = \frac{P_1}{I_1^2} = \frac{40}{4^2} = 2,5\ Ом; \qquad Z_{екв} = \frac{U_1}{I_1} = \frac{26}{4} = 6,5\ Ом;$$

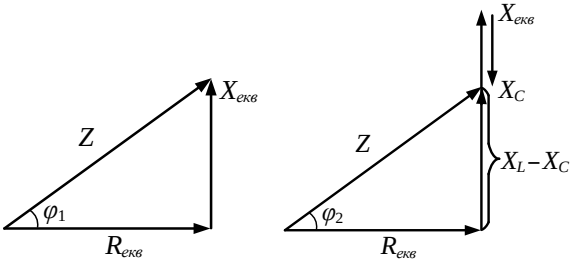
$$\left|X_{екв}\right| = \sqrt{Z_{екв}^2 - R_{екв}^2} = \sqrt{6,5^2 - 2,5}^2 = 6\ Ом.$$

За даними другого досліду знаходимо (схема *б*):

$$Z_2 = \frac{U_1}{I_2} = \frac{26}{5,53} = 4,7 Ом; \ \left|X_2\right| = \sqrt{Z_2^2 - R_{екв}^2} = \sqrt{4,7^2 - 2,5^2} = 4\ Ом.$$

При незмінній прикладеній напрузі та постійному активному опорі струм I_2 вийшов більше струму I_1. Тобто введений додатковий ємнісний опір зменшив загальний реактивний опір $X_2 < X_1$, $Z_2 = \sqrt{R_{екв}^2 + \left(X_L - X_C\right)^2}$, а це означає що $X_{екв}$ має індуктивний характер. Значення індуктивності $L_{екв} = \frac{X_{екв}}{\omega} = \frac{6}{314} = 19,1\ мГн$.

Зображаємо трикутник опорів.



а) *б*)

Приклад 16. В електричному колі з'єднано паралельно резистор з опором R = 10 *Ом* та котушку індуктивності X_L = 8 *Ом*. Визначити повну провідність цього кола.

Розв'язок. Активна провідність резистора рівна:

$$G = \frac{1}{R} = \frac{1}{10} = 0,1\ См.$$

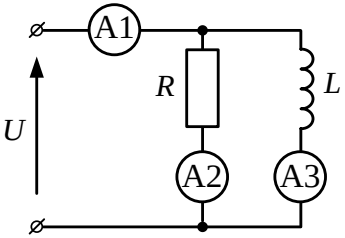
Реактивна провідність котушки рівна:

$$B_L = \frac{1}{X_L} = \frac{1}{8} = 0{,}125 \text{ } Ом.$$

Тоді повна провідність кола дорівнює:

$$Y = \sqrt{G^2 + \left(B_L - B_C\right)^2} = \sqrt{0{,}1^2 + \left(0{,}125 - 0\right)^2} = 0{,}16 \text{ } См.$$

Приклад 17. В електричному колі, зображеному на рисунку, напруга джерела U = 40 B, показ першого амперметра I_{A1} = 4 A, а опір резистора R = 14 $Ом$. Визначити кут зсуву фаз та повну реактивну провідність.



Розв'язок. Визначаємо повну провідність кола:

$$Y = \frac{1}{Z} = \frac{4}{40} = 0{,}1 \text{ } См.$$

Активна провідність вітки з резистором**:**

$$G = \frac{1}{R} = \frac{1}{14} = 0{,}0714 \text{ } См.$$

З трикутника провідностей визначаємо:

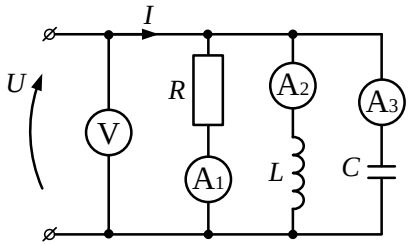
$$\cos\varphi = \frac{G}{Y} = \frac{0{,}0714}{0{,}1} = 0{,}714\text{, звідки } \varphi = 44{,}44^{\circ}.$$

Тоді повна реактивна провідність кола:

$$B = Y\sin\varphi = Y\sqrt{1 - \cos^2\varphi} = 0{,}1\sqrt{1 - 0{,}714^2} = 0{,}07 \text{ } См.$$

Приклад 18. За показами приладів, увімкнених в коло, зображене на рисунку, визначити струм, що прохо-

дить в нерозгалуженій ділянці кола, опір кожної вітки та повний опір кола. Замінити дане коло еквівалентним колом з послідовно з'єднаними опорами, побудувати векторну діаграму, якщо $U = 120$ *В*, $I_1 = 3$ *А*, $I_2 = 6$ *А*, $I_3 = 2$ *А*.



Розв'язок. Знаходимо опори і провідності окремих віток і всього кола:

$$R = \frac{U}{I_1} = \frac{120}{3} = 40\ Ом \qquad G = \frac{1}{R} = \frac{1}{40} = 0,025\ См$$

$$X_L = \frac{U}{I_2} = \frac{120}{6} = 20\ Ом \qquad B_L = \frac{1}{X_L} = \frac{1}{20} = 0,05\ См$$

$$Xc = \frac{U}{I_3} = \frac{120}{2} = 60\ Ом \qquad Bc = \frac{1}{Xc} = \frac{1}{60} = 0,016\ См$$

$$G_{екв} = G = 0,025\ См.$$

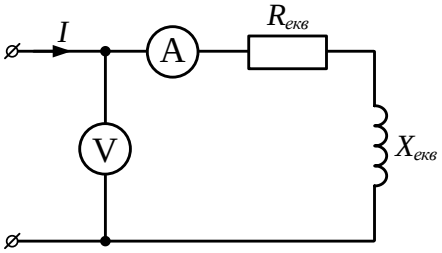
$$B_{екв} = B_L - B_C = \frac{1}{20} - \frac{1}{60} = 0,033\ См\left(індуктивний\right)$$

$$Y_{екв} = \sqrt{G_{екв}{}^2 + B_{екв}{}^2} = \sqrt{0,025^2 + 0,033^2} = 0,042\ См$$

$$Z_{екв} = \frac{1}{Y} = \frac{1}{0,042} = 24\ Ом.$$

Задана схема кола може бути замінена іншою, їй еквівалентною, яка складається із послідовно з'єднаних елементів, параметри якої знаходимо за формулами:

$$R_{екв}=\frac{G_{екв}}{Y_{екв}^2}=\frac{0,025}{0,042}=14,4\ Ом;\quad X_{екв}=\frac{B_{екв}}{Y_{екв}^2}=\frac{0,33}{0,042}=19,2\ Ом.$$

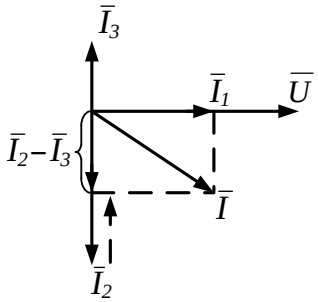


Перевірка: $Z_{екв}=\sqrt{14,4^2+19,2^2}=24\ Ом$.

Визначаємо струм в нерозгалуженій частині кола:

$$I=\frac{U}{Z_{екв}}=\frac{120}{24}=5\ A.$$

Векторна діаграма струмів та напруг:



$$I=\sqrt{I_1^2+\left(I_2-I_3\right)^2}=\sqrt{3^2+\left(6-2\right)^2}=5\ A.$$

Приклад 19. Визначити резонансну частоту в колі з послідовно з'єднаних резистора R = 2 *Ом*, котушки L = 20 *мГн* та конденсатора C = 250 *мкФ*.

Розв'язок. Резонансну частоту визначаємо за виразом: $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2 \cdot 3{,}14 \cdot \sqrt{20 \cdot 10^{-3}} \cdot 250 \cdot 10^{-6}} = 71{,}21\ Гц.$

Приклад 20. Котушка індуктивності, яка має параметри R = 0,4 *Ом,* L = 40 10^{-3} *Гн,* і конденсатор ємністю C = 100 *мкФ* з'єднані послідовно. Визначити резонансну частоту ω_0, добротність контуру, а також споживану активну потужність кола і реактивну потужність конденсатора в режимі резонансу при діючому значенні прикладеної напруги U = 10 *В*.

Розв'язок. Резонансна частота визначається за формулою: $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{\sqrt{40 \cdot 10^{-3} \cdot 100 \cdot 10^{-6}}} = 500\ с^{-1}.$

Добротність контуру рівна: $Q = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{500 \cdot 40 \cdot 10^{-3}}{0{,}4} = 50.$

Струм в контурі в режимі резонансу визначається як:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{10}{0{,}4} = 25\ А.$$

Активна потужність : $P = UI = 10 \cdot 25 = 250 Вт$.

Реактивна потужність:

$$Q = I^2 X_C = \frac{I^2}{\omega C} = 25^2 \cdot \frac{1}{500 \cdot 100 \cdot 10^{-6}} = 12500\ вар.$$

Приклад 21. Реостат з активним опором R = 100 *Ом,* котушка з індуктивністю L = 5,05 *мГн* та конденсатор ємністю C = 0,05 *мкФ* з'єднані послідовно. Обчислити резонансну частоту, характеристичний опір, загасання контуру, напруги U_{Lo} та U_{Co} для резонансної частоти. Діюче значення прикладеної напруги U = 10 *В*.

Розв'язок. Резонансна частота визначається за формулою:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{\sqrt{5,05\cdot10^{-3}\cdot0,05\cdot10^{-6}}} = 6,28\cdot10^4 \ \ рад/с,$$

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{6,28\cdot10^4}{2\cdot3,14} = 10^4 \ Гц.$$

Характеристичний опір: $\rho = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{5,05\cdot10^{-3}}{0,05\cdot10^{-6}}} = 318 \ Ом.$

Перевірка: $X_{L0} = \omega_0 L = 6,28\cdot10^4\cdot5,05\cdot10^{-3} = 317,4 \ Ом,$

$$X_{C0} = \frac{1}{\omega_0 C} = \frac{1}{6,28\cdot10^4\cdot0,05\cdot10^{-6}} = 318,5 \ Ом.$$

Отже, $\rho \approx X_{L0} \approx X_{C0}$.

Добротність контуру дорівнює: $Q = \frac{\rho}{R} = \frac{318}{100} = 3,18.$

Загасання контура: $d = \frac{1}{Q} = \frac{1}{3,18} = 0,314.$

Струм в контурі в режимі резонансу рівний:

$$I_0 = \frac{U}{R} = \frac{10}{100} = 0,1 \ A.$$

Напруги на котушці та конденсаторі:

$$U_{L0} = I_0 X_{L0} = I\rho = UQ = \frac{U}{d} = \frac{10}{0,314} = 31,85 \ B,$$

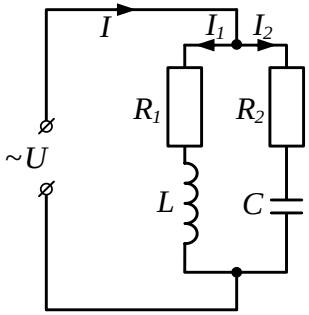
$$U_{C0} = I_0 X_{C0} = 0,1\cdot31,85 = 31,85 \ B.$$

Отже напруги на реактивних опорах при резонансі більші від прикладеної у 3,185 разів:

$$\frac{U_{L0}}{U} = \frac{31,85}{10} = 3,185, \qquad \frac{U_{C0}}{U} = \frac{31,85}{10} = 3,185.$$

Приклад 22. Знайти резонансну частоту та повний опір паралельного контуру, зображеного на рисунку, пара-

метри якого дорівнюють R_1 = 9 *Ом*, R_2 = 1 *Ом*, L = 100 *мкГн*, C = 100 *пФ*. Розрахувати струми, що проходять в кожній вітці при резонансі та потужність, що виділяється в кожній вітці при резонансі, якщо прикладена напруга U = 200 *В*.



Розв'язок. В даному випадку при R_1 = 9 *Ом* та R_2 = 1 *Ом*, можна вважати що втрати потужності в колі малі, тобто добротність $Q \gg 1$.

Дійсно це так: $Q = \dfrac{\sqrt{\dfrac{L}{C}}}{R_1 + R_2} = \dfrac{\sqrt{\dfrac{100 \cdot 10^{-6}}{100 \cdot 10^{-12}}}}{9+1} = 100$.

Тому резонансну частоту можна вичислити за наближеною формулою:

$$\omega_p = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{\sqrt{100 \cdot 10^{-6} \cdot 100 \cdot 10^{-12}}} = 10^7 \ {рад}/{с},$$

$$f_p = \frac{\omega_p}{2\pi} = \frac{10}{2 \cdot 3{,}14} = 0{,}16 \cdot 10^7 \ МГц.$$

Обчислимо опір контуру при резонансі:

$$R_p = \frac{R_1 R_2 C + L}{(R_1 + R_2) C} = \frac{0 + 100 \cdot 10^{-6}}{(1+9) \cdot 100 \cdot 10^{-12}} = 10^5 \ Ом.$$

Струм у кожній вітці буде рівним:

$$I_{1p} = \frac{U}{Z_{1p}} = \frac{U}{\sqrt{R_1^2 + (\omega L)^2}} = \frac{200}{\sqrt{9^2 + \left(10^7 \cdot 100 \cdot 10^{-6}\right)^2}} = 0,2\ A,$$

$$I_{2p} = \frac{U}{Z_{2p}} = \frac{U}{\sqrt{R_2^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}} = \frac{200}{\sqrt{1^2 + \left(\frac{1}{10^7 \cdot 100 \cdot 10^{-12}}\right)^2}} = 0,2\ A.$$

Струм джерела при резонансі буде рівним:

$$I_{1p} = \frac{U}{R_p} = \frac{200}{100 \cdot 10^3} = 2 \cdot 10^{-3}\ A.$$

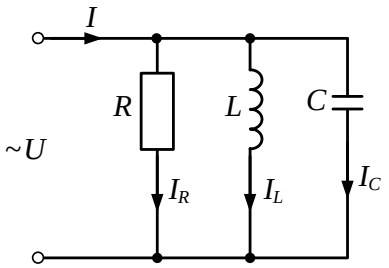
Потужність що виділяється в колі буде рівною:

$$P_p = I_p^2 R_p = \left(2 \cdot 10^{-3}\right)^2 = 0,4\ Вт.$$

Цю потужність можна вичислити і таким способом:

$$P_p = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 = 0,2^2 \cdot 10 = 0,4\ Вт.$$

Приклад 23. Коло, зображене на рисунку, складається з трьох паралельних віток, параметри яких R = 16 *Ом,* L = 1,6 *мГн,* C = 25 *мкФ* під'єднане до генератора синусоїдної напруги, діюче значення якої U = 10 *В*. Знайти резонансну частоту f_p та струми I, I_C, I_L при резонансі. Вичислити потужності генератора та споживача.



Розв'язок. Умова резонансу струмів $B_L = B_C$,

$$\frac{1}{\omega_p L} = \omega_p C \ \rightarrow\ \omega_p = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{1,6 \cdot 10^{-3} \cdot 25 \cdot 10^{-6}} = 0,5 \cdot 10^4 c^{-1}.$$

$$\omega_p = f_p \cdot 2\pi \;\rightarrow\; f_p = \frac{\omega_p}{2\pi} = \frac{0,5 \cdot 10^4}{6,28} = 796\ Гц.$$

Опір резонансного контуру рівний: $Z_p = \dfrac{1}{B_L - B_C} = \dfrac{1}{0} \to \infty$.

Струм генератора визначається тільки опором *R*:

$$I = I_R = \frac{U}{R} = \frac{10}{16} = 0,625\ A.$$

Струм на індуктивному опорі буде рівним:

$$I_L = \frac{U}{\omega_p L} = \frac{U}{X_L} = \frac{10}{0,5 \cdot 10^4 \cdot 1,6 \cdot 10^{-3}} = 1,25\ A.$$

Струм на ємнісному опорі буде рівним:

$$I_C = U\omega_p C = 10 \cdot 0,5 \cdot 10^4 \cdot 25 \cdot 10^{-6} = 1,25\ A.$$

Відбувається коливання енергій між котушкою та ємністю. Потужність генератора буде рівною:

$$P_T = I^2 R_{Lp} = UI = 10 \cdot 0,625 = 6,25\ Вт,$$

$$Q_L = I_{Lp}^2 X_{Lp} = UI_L = 10 \cdot 1,25 = 12,25\ вар,$$

$$Q_c = I_{Cp}^2 \left(-X_{Lp}\right) = \frac{1,25^2 \cdot 1}{0,5 \cdot 10^4 \cdot 25 \cdot 10^{-6}} = 1,25 \cdot \left(-8\right) = -12,5\ вар.$$

Індуктивність накопичує магнітну енергію, а ємність – електричну. Утворюється коливальний режим перетворення магнітної енергії в електричну і навпаки.

Задачі для самостійного розв'язування

Задача 1. Визначити період сигналу, якщо частота змінного струму *f* = 400 Гц, 25 Гц, 2 кГц, 40 Гц, 1250 Гц.
***Відповідь*: *2,5·10⁻³ с; 0,4·10⁻³ с; 0,5·10⁻³ с; 25·10⁻³ с;0,8·10⁻³ с*.**

Задача 2. Змінний синусоїдний сигнал має період *T* = 0,2 с; 1,0 с; 40 мс; 50; 25; 0,8 мкс. Визначити для цих значень *T* частоту *f*. ***Відповідь*: *5 Гц, 1 Гц, 25 Гц, 20 кГц, 4 кГц, 1,25 Мгц*.**

Задача 3. Визначити кутову частоту синусоїдного струму, якщо період T = 2,5·10^{-4}, 1·10^{-3}, 20·10^{-2}, 5·10^{-5}, 8·10^{-4}, 4·10^{-6} *с*. ***Відповідь: 25120; 6280; 31,4; 125600; 7850; 1,57·10^{6} с$^{-1}$***.

Задача 4. Кутова частота змінного струму ω = 3140, 942, 12560, 5024, 94200, 10048 1/*с* . Визначити частоту та період сигналу. ***Відповідь: 5000 Гц – 2,0·10^{-3}с, 150 Гц – 6,68·10^{-3}с, 2000 Гц –5·10^{-4}с , 800 Гц –1, 25·10^{-3}с, 15 кГц – 6,68·10^{-3} с, 1600 Гц – 0,625·10^{-3} с.***

Задача 5. Діюче значення змінного струму в колі I = 10,5 *А* при частоті f = 1200 *Гц*. Визначити його амплітудне значення, період і кутову частоту. ***Відповідь: 14,8 А, 7536 с; 0,835 с$^{-1}$***.

Задача 6. Амплітудне значення напруги змінного струму з періодом T = 2,23 *мс* дорівнює 220 *В*. Визначити діюче значення напруги та частоту. ***Відповідь: 156 В, 450 Гц***.

Задача 7. Амплітудне значення змінного струму частотою f = 800 *Гц* рівне 450 *мА*. Визначити діюче значення струму, кутову частоту і період. ***Відповідь: 320 мА, 5024 с$^{-1}$; 1,25·10^{-3}с.***

Задача 8. Миттєве значення струму $i = 16\sin(157t)$ *А* . Визначити амплітудне і діюче значення цього струму та його період.

Задача 9. Амплітудне значення напруги в колі U_m = 120 *В,* початкова фаза $\psi_U = \frac{\pi}{4}$. Записати вираз миттєвого значення цієї напруги, визначити її діюче значення. ***Відповідь: 85 В***.

Задача 10. Діюче значення змінного струму в колі I = 2,9 A, початкова фаза $\psi_I = -\frac{2\pi}{3}$. Записати вираз для миттєвого значення струму в колі і визначити його амплітудне значення.

Задача 11. Миттєве значення ЕРС генератора рівне $e = 8,45\sin\left(126t + \frac{\pi}{4}\right)$ *В*. Визначити амплітудне і діюче значення ЕРС, кутову частоту, період і початкову фазу. ***Відповідь: 8,4 В, 6 В, 1256 с$^{-1}$; 5,0·10^{-3} с, 45 °***.

Задача 12. Визначити період синусоїдного струму $i = 2\sin\left(628t - 45^\circ\right)$ та значення струму при t = 0. ***Відповідь: 0,01 с , –1,41 А***.

Задача 13. Визначити амплітудне значення та записати миттєве значення напруги. джерела, якщо показ вольтметра U = 110 *В*. ***Відповідь: 155,56 В***.

Задача 14. В колі змінного струму промислової частоти протікає струм $i = 14,1\sin\left(314t + 60^\circ\right)$. Визначити амплітудне і діюче значення струму і початкову фазу струму.
Відповідь: 14,1 А, 10 А, 60 °.

Задача 15. За допомогою вольтметра виміряли напругу джерела, миттєве значення якої рівне $u = 242\sin\left(314t + 60^\circ\right)$. Обчислити показ вольтметра, якщо він показує діюче значення величини. ***Відповідь:171,1 В.***

Задача 16. Напруга в колі змінюється за законом $u = U_m \sin\left(\omega t + 90^\circ\right)$.Через час t = 0,02 c вона дорівнює

110, частота напруги в мережі f = 50 *Гц*. Визначити показ вольтметра, ввімкненого на повну напругу мережі.
Відповідь: 91,213 В.

Задача 17. В колі змінної напруги $u = 282\sin\left(157t + 45^\circ\right)$ *В* протікає струм $i = 2{,}12\sin\left(157t - 30^\circ\right)$ *А*. Визначити частоту напруги і струму, діюче значення напруги і струму, їх початкові фази, зсув фаз між напругою та струмом.
Відповідь: 75°, 45°, –30°, 200 В.

Задача 18. Миттєве значення змінного струму в електричному колі $i = 7{,}8\sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$ *А*. Визначити значення постійного струму, який потрібно пропустити по тому ж колу, щоб в ньому виділилось таж сама кількість теплоти. ***Відповідь: 5,5 А***.

Задача 19. В електричному колі проходить постійний струм I = 4,4 *А*. Визначити амплітудне значення змінного струму, який проходячи по тому ж колу виділить таку ж кількість теплоти, що і постійний струм. ***Відповідь: 6,2 А***.

Задача 20. В коло змінного струму увімкнений резистор. Діюче значення струму і напруги на ньому I = 350 *мА* і U = 42 *В*. Визначити опір резистора, потужність, яка виділяється на ньому, та амплітудне значення струму.
Відповідь: 120 Ом, 14,7 Вт, 0,49 А.

Задача 21. Через резистор з опором R = 20 *Ом* проходить струм $i = 0{,}75\sin\omega t$ *А*. Визначити потужність, амплітудне та діюче значення спаду напруг на резисторі.
Відповідь: 5,6 Вт, 15 В, 10,6 В.

Задача 22. До резистора з опором R = 1,5 *кОм* прикладена напруга $u = 120\sin\left(\omega t - \frac{\pi}{6}\right)$ *В.* Записати вираз для миттєвого значення струму, визначити його амплітудне та діюче значення, потужність. ***Відповідь: 0,08 А, 0,057 А, 4,8 Вт***.

Задача 23. В колі змінного струму через резистор проходить струм $i = 0,4\sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$ *А,* при цьому діюче значення спаду напруги U = 28,4 *В*. Визначити опір резистора і потужність, яка виділяється на ньому. ***Відповідь: 100 Ом, 8,05 Вт***.

Задача 24. В коло змінного струму увімкнений резистор. Діюче значення струму і напруги в ньому I = 350 *мА* і U = 42 *В*. Визначити опір резистора, потужність, яка виділиться на ньому, а також амплітудне значення струму.
Відповідь: 120 Ом, 14,7 Вт, 0,49 А.

Задача 25. Через резистор з опором R = 20 *Ом* протікає струм $i = 0,75\sin\omega t$ *А.* Визначити потужність, амплітудне і діюче значення спаду напруг на резисторі.
Відповідь: 5,6 Вт, 15 В, 10,6 В.

Задача 26. На резисторі з опором R = 3,2 *Ом*, який увімкнений в коло змінного струму, виділяється потужність P = 20 *Вт*. Визначити діюче і амплітудне значення струму і напруги. ***Відповідь: 2,5 А, 3,5 А, 8 В, 11,3 В***.

Задача 27. Реактивний опір конденсатора на частоті 50 *Гц* дорівнює X_c = 12 *Ом.* Визначити ємність конденсатора та його опір на частоті 150 *Гц*. ***Відповідь: 265,4 мкФ, 4 Ом***.

Задача 28. Конденсатор увімкнений до джерела змінного струму з частотою f = 50 *Гц* і амплітудним значенням на-

пруги U_m = 150 *В*. Діюче значення струму в конденсаторі I = 2,5 *А*. Визначити ємність конденсатора. ***Відповідь: 75 мкФ***.

Задача 29. Через конденсатор ємністю C = 0,1 *мкФ* проходить змінний струм, діюче значення якого I = 50 *мА*. Частота джерела f = 500 *Гц*. Визначити діюче і амплітудне значення напруги на конденсаторі та його опір.
Відповідь: 160 В, 226 В, 3200 Ом.

Задача 30. До конденсатора ємністю C = 15 *мкФ* прикладена напруга змінного струму з частотою f = 200 *Гц* і діючим значенням U = 36 *В*. Визначити опір конденсатора і діюче значення струму. ***Відповідь: 53 Ом, 0,68 А***.

Задача 31. Діюче значення струму I через конденсатор ємністю C = 720 *пФ* дорівнює 150 *мА*. При цьому амплітудне значення напруги U_m = 120 *В*. Визначити період змінного струму. ***Відповідь: 25,6 мкс***.

Задача 32. Через котушку індуктивності з опором X_L = 1,2 *Ом* протікає змінний струм з частотою f = 800 *Гц* і амплітудним значенням $I_м$ = 450 *мА*. Визначити індуктивність котушки, діюче значення напруги на ній, а також повну споживану потужність. ***Відповідь: 0,24 мГн, 0,38 В***.

Задача 33. До джерела змінного струму з частотою f = 25 *Гц* підключена індуктивна котушка. Діюче значення струму через котушку I = 7 *А*, активна потужність P = 166,6 *Вт*, спад напруги на індуктивному опорі котушки U_L = 54 *В*. Визначити повний і активний опір котушки, її індуктивність, діюче значення прикладеної напруги.
Відповідь: 8,4 Ом, 3,4 Ом, 0,049 Гн, 59 В.

Задача 34. Напруга вітки з послідовно увімнениими резистором та конденсатором дорівнює U = 50 *В*, а струм I = 2 *А*.

Визначити ємність конденсатора, якщо активний опір вітки R = 8 *Ом*, а частота f = 50 *Гц*. ***Відповідь: 134,5 мкФ***.

Задача 35. Визначити повний опір кола з послідовно з'єднаними резистором R = 8 *Ом* та конденсатором C = 400 *мкФ*, якщо напруга прикладена до кола, змінюється з частотою f = 100 *Гц*.

Задача 36. До мережі змінного струму частотою 50 *Гц* і напругою U = 380 *В* приєднано котушку з активним опором R = 10 *Ом* та індуктивним опором X_L = 22 *Ом*. Визначити струм у колі. ***Відповідь: 15,7 А***.

Задача 37. В коло змінного струму напругою U = 220 *В* і частотою 50 *Гц* ввімкнено послідовно з'єднані опори: активний R = 5 *Ом* та індуктивний X_L = 10 *Ом*. Знайти струм у колі. ***Відповідь: 19,6 А***.

Задача 38. Напруга вітки з послідовно увімкненими резистором та конденсатором дорівнює U = 50 *В*, а струм I = 2 *А*. Визначити ємність конденсатора, якщо активний опір вітки R = 8 *Ом*, а частота f = 50 *Гц*. ***Відповідь: 134,5 мкФ***.

Задача 39. Діюче значення струму, що проходить через конденсатор і послідовно з'єднаний з ним резистор I = 4,5 *А*. Повний опір кола Z = 3 *Ом*. Визначити опір резистора, ємність конденсатора, повну, активну і реактивну потужності, діючі значення напруги на вході в колі, якщо U_R = 5 *В*, а частота джерела f = 1500 *Гц*. ***Відповідь: 1,1 Ом, 38 мкФ, 61 ВА, 22,5 Вт, –56,7 вар, 13,5 В***.

Задача 40. До споживача, який складається з послідовно з'єднаних резистора і конденсатора, підведена змінна напруга з діючим значенням U = 500 *В*. Активна потужність споживача P = 320 *Вт*, $\cos\varphi$ = 0,75. Визначити струм в ко-

лі, повний, активний і реактивний опір споживача. ***Відповідь: 855 мА, 428 ВА, 282 вар, 585 Ом, 440 Ом , 385 Ом***.

Задача 41. В колі змінного струму послідовно з'єднані резистор, котушка та конденсатор. Вольтметри на кожному з них відповідно показують 30 *В,* 50 *В,* 90 *В*. Обчислити значення напруги, прикладеної до кола. ***Відповідь: 50 В***.

Задача 42. В електричному колі з послідовно з'єднаними резистором, котушкою та конденсатором виміряли напругу на кожному з них U_R = 40 *В*, U_L = 60 *В*, U_C = 80 *В*. Визначити показ вольтметра, увімкненого паралельно до джерела, якщо котушка і конденсатор ідеальні. Побудувати векторну діаграму.

Задача 43. Для послідовно з'єднаних резистора, індуктивної котушки і конденсатора відомі діючі значення трьох напруг з чотирьох:

U_R =4 *В*, U_L =4 *В*, U_C =1,6 *В*. $U_{вх}$ – ?

U_R =3 *В*, U_L =1 *В*, $U_{вх}$=5 *В*, U_C – ?

U_R =6 *В*, $U_{вх}$ =8 *В*, U_C =10 *В*, U_L – ?

$U_{вх}$ =2,7 *В*, U_L 14 *В*, U_C =15 *В*, U_R – ?

Визначити для кожного варіанту діючі значення четвертої напруги і коефіцієнт потужності. Побудувати векторну діаграму.

Задача 44. В електричному колі з послідовно з'єднаними резистороmр з опором R = 6,5 *Ом*, котушкою з індуктивністю L = 20 *мГн* та конденсатором ємністю C = 30 *мкФ* підведена напруга змінного струму з частотою f = 150 *Гц* і діючим значенням U = 30 *В*. Визначити повний опір кола, діюче значення струму, повну споживану потужність, коефіцієнт потужності. ***Відповідь: 17,8 Ом, 1,68 А, 50,5 ВА, 0,366***.

Задача 45. В електричному колі, яке складається з послідовно увімкнених конденсатора з опором X_C = 265 *Ом*, котушки з індуктивним X_L = 157 *Ом* і активним R = 92 *Ом* опорами, проходить струм $i = 0,4\sin\left(314t - 20^\circ\right) A$. Визначити повний опір кола, діюче значення вхідної напруги, повну споживану потужність, коефіцієнт потужності.
Відповідь: 142,8 Ом, 39,2 В, 17,9 ВА, 0,648.

Задача 46. Через послідовно з'єднані резистор та котушку індуктивності протікає змінний струм I = 1 *А* з частотою f = 50 *Гц*. Визначити всі напруги, потужності, якщо R = 60 *Ом*, L = 0,25 *Гн*. Побудувати векторну діаграму.

Задача 47. Через послідовно з'єднані резистор, конденсатор та котушку індуктивності протікає змінний струм I = 2 *А*, з частотою f = 50 *Гц*. Визначити всі напруги, потужності, якщо R = 30 *Ом*, X_L = 80 *Ом*, X_C = 40 *Ом*. Побудувати векторну діаграму.

Задача 48. До послідовно з'єднаних резистора та конденсатора підведена змінна напруга U = 220 *В*, з частотою f = 50 *Гц*. Визначити всі напруги, струм, потужності, якщо R = 80 *Ом*, $C = 5,1\cdot10^{-5}$ *ф*. Побудувати векторну діаграму.

Задача 49. Визначити кут зсуву фаз і повний реактивний опір кола, якщо воно складено з послідовно з'єднаних резистора R = 12 *Ом* та котушки індуктивності. Напруга джерела U = 80 *В*, струм що проходить в ньому I = 2,5 *А*.
Відповідь: 0,375 рад, 29,7 Ом.

Задача 50. В електричному колі з послідовним з'єднанням резистора та котушки індуктивності діє джерело з напругою 220 *В*. Визначити активну та реактивну потужності, що споживаються в цьому колі, якщо R = 10 *Ом*, L = 50 *мГн*, f = 50 *Гц*. ***Відповідь: 1397,12 Вт, 2193,48 вар***.

Задача 51. В електричному колі з послідовно з'єднаними резистором, котушкою індуктивності та конденсатором виміряли напругу на кожному з них: U_R = 40 *В*, U_L = 60 *В*, U_C = 80 *В*. Визначити показ вольтметра, увімкненого паралельно до джерела, якщо котушка і конденсатор ідеальні. ***Відповідь: 44,72 В***.

Задача 52. До мережі змінного струму частотою 50 *Гц* паралельно приєднуються чотири конденсатори ємністю C = 1 *мкФ*. Напруга в колі змінюється за законом $u = 250\sin\omega t$. Записати вираз миттєвого значення струму в колі.

Задача 53. Визначити провідність вітки з конденсатором C = 350 *мкФ*, якщо струм у цій вітці змінюється з частотою f = 50 *Гц*. ***Відповідь: 0,11 Ом$^{-1}$***.

Задача 54. До джерела напруги U = 100 *В* підєднано дві паралельні вітки з резистором R = 12 *Ом* та конденсатором X_C = 20 *Ом* відповідно. Визначити провідності віток з резистором та конденсатором.

Задача 55. В трьох паралельних вітках з резистором, котушкою та конденсатором, відповідно, увімкнено амперметри. До кола прикладено напругу від синусоїдного джерела. Визначити струм джерела, якщо покази амперметрів I_R = 2 *А*, I_L = 4 *А*, I_C = 3 *А*. ***Відповідь: 2,24 А***.

Задача 56. До джерела напруги увімкнено дві паралельні вітки з резистором та котушкою індуктивності відповідно. Визначити активну, реактивну потужності кола та коефіцієнт потужності, якщо струм джерела енергії I = 4 *А*, R = 5 *Ом*. X_L = 8 *Ом*. ***Відповідь: 57,6 Вт, 35,84 вар, 0,85.***

Задача 57. В електричному колі з'єднано паралельно резистор R = 10 *Ом* та котушку індуктивності X_L = 8 *Ом*. Визначити повну провідність цього кола. ***Відповідь: 0,16 См***.

Задача 58. До джерела напруги U = 100 *В* підєднано дві паралельні вітки з резистором R =12 *Ом* та конденсатором X_C = 20 *Ом* відповідно. Визначити струм у вітці з джерелом напруги. ***Відповідь: 9,7 А***.

Задача 59. Визначити провідність віти з конденсатором C = 350 *мкФ*, якщо струм у цій вітці змінюється з частотою f = 50 *Гц*. ***Відповідь: 0,11 См***.

Задача **60**. До джерела змінного струму з діючим значенням напруги U = 50 *В* під'єднані паралельно котушка з індуктивним опором X_L = 8 *Ом* і резистор з опором R = 40 *Ом*. Визначити діюче значення струмів в обох вітках і в нерозгалуженій частині кола, повну, активну і реактивну провідності і потужності кола, коефіцієнт потужності.

Задача 61. Паралельно з'єднані резистор з опором R = 24 *Ом*, котушка з індуктивністю L = 15,9 *мГн* і конденсатор ємністю C = 15 *мкФ* під'єднані до джерела з амплітудним значенням напруги U_m = 70 *В* і частотою f = 400 *Гц*. Визначити діюче значення струмів у всіх вітках, повну, активну і реактивну потужності всього кола, коефіцієнт потужності.

Задача 62. Визначити резонансну частоту в колі з послідовно з'єднаних резистора R = 2 *Ом*, котушки індуктивності L = 20 *мГн* та конденсатора C = 250 *мкФ*. ***Відповідь: 71,21 Гц***.

Задача 63. У коло змінного струму ввімкнено три послідовно з'єднані опори: активний R = 10 *Ом*, індуктивний з індуктивністю L = 0,7 *мГн* та ємнісний з ємністю C = 0,8 *мкФ*. Знайти частоту, при якій в колі наступить ре-

зонанс, а також струм при цій частоті, якщо напруга U = 220 *В*. ***Відповідь: 6711 Гц, 22 А***.

Задача 64. В електричному колі з послідовно з'єднаними котушкою та конденсатором діє джерело напруги $u = 100\sin(500t)$. Визначити ємність конденсатора, при якій в цьому колі наступить резонанс напруг, якщо індуктивність котушки L = 80 *мГн*. ***Відповідь: 50 мкФ***.

Задача 65. Визначити показ амперметра в колі з послідовно з'єднаними резистором, котушкою та конденсатором, якщо в ньому має місце резонанс напруг і відомо напругу джерела U = 40 *В* та опір резистора R = 5 *Ом*.
Відповідь: 8 А.

Задача 66. В електричному колі з послідовно з'єднаними резистором, котушкою та конденсатором змінної частоти необхідно встановити режим резонансу. Якою повинна бути частота джерела енергії, якщо параметри кола такі: R = 4 *Ом*, L = 100 *мГн*, C = 400 *мкФ*.
Відповідь: 25,18 Гц.

Задача 67. В електричному колі з паралельно з'єднаними резистором, котушкою та конденсатором необхідно встановити режим резонансу. Якою повинна бути ємність конденсатора, якщо коло має такі параметри: R = 4 *Ом*, L = 100 *мГн*, f_0 = 100 *Гц*. ***Відповідь: 25,4 мкФ***.

Задача 68. Активна потужність котушки індуктивності складає P = 2,5 *Вт* при діючому значенні синусоїдної напруги на ній U = 25,5 *В*, частоті 500 *Гц* та діючому значенні струму I = 0,5 *А*. Визначити ємність конденсатора, який необхідно увімкнути послідовно до котушки індуктивності, щоб при частоті 500 *Гц* в колі мав місце резонанс напруг. ***Відповідь: 6,37 мкФ***.

Задача 69. Знайти параметри котушки індуктивності $R_к$, L, ємність та опір реостату R, увімкнених в коло, якщо при резонансі прилади показали наступні значення: U = 200 *В*, U_{10} = 204 *В*, U_{20} = 180 *В*, I_0 = 4 *А*, f = 50 *Гц*.
Відповідь: 24 Ом, 0,143 Гн, $70{,}7\cdot10^{-6}$ Ф.

Задача 70. Визначити показ амперметра в колі з послідовно з'єднаними резистором, котушкою індуктивності та конденсатором, якщо в ньому має місце резонанс напруг й відомо напругу джерела U = 40 *В* та опір резистора R = 5 *Ом*.

Задача 71. Визначити резонансну частоту в колі з паралельно з'єднаних резистора R = 5 *Ом*, котушки індуктивності L = 50 *мГн* та конденсатора C = 500 *мкФ*.

Задача 72. В електричному колі з паралельно з'єднаними котушкою індуктивності та конденсатором діє джерело напруги $u = 50\sin(400t)$. Визначити ємність конденсатора, при якій в цьому колі наступить резонанс струмів, якщо індуктивність котушки L = 50 *мГн*.

Задача 73. Визначити показ амперметра у вітці з джерелом напруги, якщо до нього під'єднано паралельні вітки з резистором, котушкою індуктивності та конденсатором. В колі має місце резонанс струмів, напруга джерела U = 50 *В*, опір резистора R = 10 *Ом*.

Задача 74. Визначити резонансну частоту в колі з паралельно з'єднаних резистора R = 5 *Ом*, котушки індуктивності L = 50 *МГн* та конденсатора C = 500 *мкФ*. ***Відповідь: 31,85 Гц***.

Задача 75. В електричному колі з паралельно з'єднаними котушкою індуктивності та конденсатором діє джерело напруги $u = 50\sin 400t$. Визначити ємність конденсатора,

при якій в цьому колі наступить резонанс струмів, якщо індуктивність котушки L = 50 *мГн*. ***Відповідь: 125 мкФ***.

Задача 76. Визначити показ амперметра у вітці з джерелом напруги, якщо до нього під'єднано паралельні вітки з резистором, котушкою індуктивності та конденсатором. В колі має місце резонанс струмів, напруга джерела U = 50 *В* та опір резистора R = 10 *Ом*. ***Відповідь: 5 А***.

Задача 77. Котушка індуктивністю L = 120 *мГн* і конденсатор ємністю C = 25 *мкФ* з'єднані паралельно і під'єднані до джерела змінного струму з діючим значенням напруги U = 75 *В*. Визначити резонансну частоту і діюче значення струмів у всіх вітках. ***Відповідь: 92 Гц, 1,08 А***.

Запитання для самоперевірки

1. Спосіб утворення синусоїдних ЕРС.
2. Основні параметри періодичних синусоїдних величин.
3. Який зв'язок між частотою f змінного струму, вираженою в герцах та кутовою частотою ω?
4. Який зв'язок між кутовою частотою ω та періодом T?
5. Визначення діючого та середнього значення періодичних синусоїдних величин.
6. Яке співвідношення між діючим і амплітудним значенням струму?
7. Особливості елементів кола змінного струму.
8. Як визначаються реактивні опори котушки індуктивності та конденсатора?
9. Який кут зсуву фаз між напругою і струмом резистора.
10. Який кут зсуву фаз між напругою і струмом котушки індуктивності?
11. Який кут зсуву фаз між напругою і струмом конденсатора?
12. Повний опір вітки при змінному струмові.

13. Інтерпретація трикутників опорів.
14. Повна провідність вітки. Складові трикутника провідностей.
15. Потужності кола змінного струму.
16. Фізична інтерпретація активної, реактивної та повної потужностей.
17. Типи резонансу у колах змінного струму та умови їх виникнення.
18. В якому електричному колі має місце резонанс напруг ?
19. В якому електричному колі має місце резонанс струмів ?
20. Що таке добротність контуру ?
21. Що називається характеристичним опором ?
22. Чи залежать добротність контуру та характеристичного опору від частоти ?

Розділ 4. Трифазні електричні кола

Після вивчення даного розділу

Ви повинні знати:

1. Властивості трифазних симетричних кіл.
2. Співвідношення між фазними та лінійними величинами.
3. Роль нульового проводу в трифазних колах.

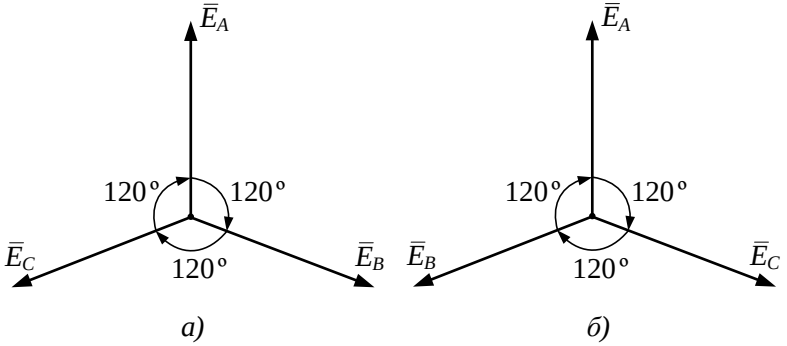
Ви повинні вміти:

1.Визначати та вимірювати фазні та лінійні струми та напруги.

2.Аналізувати симетричні трифазні кола при з'єднанні навантаження зіркою та трикутником.

Основні теоретичні відомості

Трифазна система ЕРС – це три синусоїдні ЕРС однакової частоти, зсунені за фазою одна відносно іншої на кут 120º і вироблених одним джерелом. Частину багатофазного кола, в якій діє одна з ЕРС, називають ***фазою***. Тому окремі обвитки генератора називають фазними обвитками чи фазами генератора. Система трифазних ЕРС називається ***симетричною***, якщо ЕРС кожної з фаз мають однакові амплітуди і зсунені в часі на 120º. Векторне відображення трифазної системи показано на рис. 12.



а) *б)*

Рис. 12. Векторне відображення трифазної системи ЕРС з прямим чергуванням фаз (а) і зворотним чергуванням фаз (б)

Особливість симетричної трифазної системи ЕРС полягає в тому, що сума їх миттєвих значень в будь-який момент часу дорівнює нулю: $U_A + U_B + U_C = 0$. В трифазному колі використовують в основному два види з'єднання фаз: трикутником і зіркою. З'єднання ***зіркою*** (рис. 13). передбачає, що кінці фаз генератора (споживача) об'єднуються в один вузол *N*, який називають ***нейтральною точкою*** або просто ***нейтраллю***.

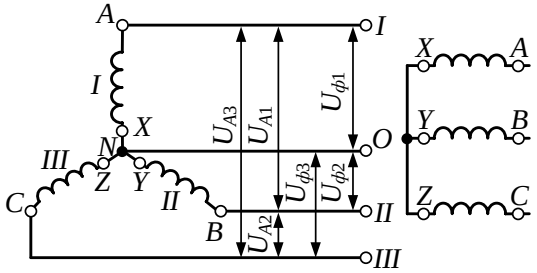


Рис. 13. З'єднання фаз генератора зіркою

Провід, що з'єднує нейтральні точки генератора та приймача називають ***нейтральним (нульовим) проводом***. Решта три проводи, які з'єднують генератор з приймачем називають ***лінійними***. Напруги між початками відповідних фаз і нейтральною точкою називаються ***фазними напругами***, а напруги між початками відповідних фаз – ***лінійними напругами***.

В трифазному симетричному колі із з'єднанням фаз зіркою лінійна напруга більша від фазної в $\sqrt{3}$ разів, а її початкова фаза випереджає початкову фазу фазної напруги на 30°, тобто $U_л = \sqrt{3}U_ф$; $\psi_{иЛ} = \psi_{иф} + 30^\circ$, а струми лінійний і фазний рівні $I_л = I_ф$. Векторна діаграма напруг показана на рис. 14.

Трифазний споживач називається ***симетричним***, якщо однакові відповідно активні і реактивні опори його трьох фаз: $R_a = R_b = R_c = R_ф$, $X_a = X_b = X_c = X_ф$.

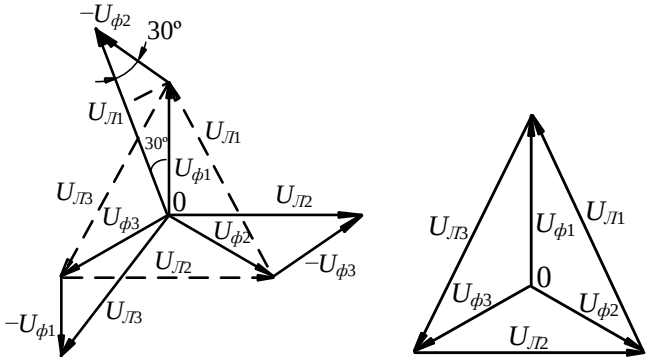


Рис. 14. Векторна діаграма напруг при з'єднанні фаз генератора зіркою

Струм у нульовому проводі у випадку симетричного навантаження дорівнює нулю.

З'єднання ***трикутником*** передбачає, що кінець першої фази з'єднуються з початком другої, кінець другої – з початком третьої, а кінець третьої – з початком першої. Таким чином, три фази утворюють замкнений трикутник (рис. 15).

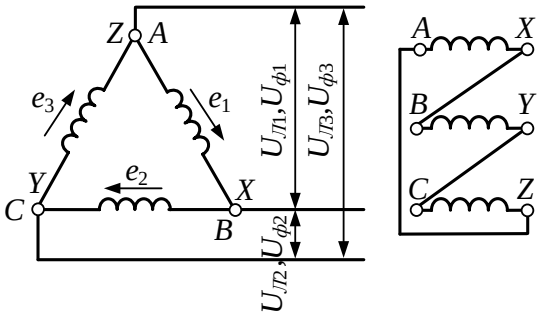


Рис. 15. З'єднання фаз генератора трикутником

В трифазному симетричному колі із з'єднанням фаз трикутником лінійний струм більший від фазного в $\sqrt{3}$ разів, а його початкова фаза відстає від початкової фази фаз-

ного струму на 30°, тобто $I_л = \sqrt{3} I_ф$; $\psi_{iл} = \psi_{iф} - 30^\circ$, а лінійна і фазна напруги рівні $U_л = U_ф$. Векторна діаграма напруг показана на рис. 16.

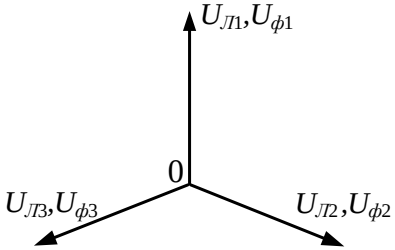


Рис. 16. Векторна діаграма напруг при з'єднанні фаз генератора трикутником.

При з'єднанні трикутником отримуємо ***трипровідну систему***, а при з'єднанні зіркою – ***чотирипровідну***.

У трифазному колі із симетричним навантаженням потужності трьох фаз однакові $P_a = P_в = P_c = P_ф$ як для з'єднання зіркою, так і для з'єднання трикутником.

Сумарні потужності трифазного споживача рівні:

$$P = 3P_ф = 3\, U_ф\, I_ф \cos\varphi,$$

$$Q = 3\, Q_ф = 3\, U_ф\, I_ф \sin\varphi,$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = 3U_ф I_ф.$$

Вирази для потужностей симетричного споживача із з'єднанням фаз зіркою або трикутником можна записати через лінійні величини так:

$$P = \sqrt{3} U_л I_л \cos\varphi; \quad Q = \sqrt{3} U_л I_л \sin\varphi; \quad S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{3} U_л I_л.$$

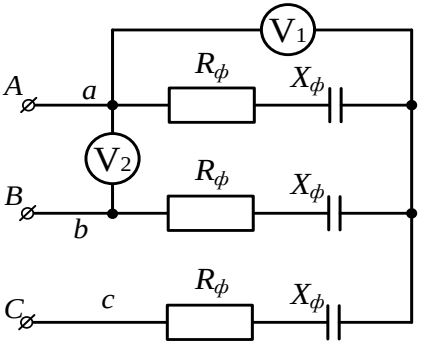
При незмінній напрузі живлення та незмінному опорі фаз навантаження потужність при з'єднанні трикутником в три рази більша ніж при з'єднанні зіркою: $P_\Delta = 3P_\curlywedge$.

Приклади розв'язування задач

Приклад 1. Миттєве значення ЕРС фази *B* дорівнює $e_B = 150\sin\left(\omega t + 45^\circ\right)$ *B*. Визначити максимальне значення ЕРС фази *C* та її початкову фазу, якщо ці ЕРС утворюють симетричну систему.

Розв'язок. Оскільки ЕРС утворюють симетричну систему, то їх максимальні значення однакові, отже $E_{Bm} = E_{Cm} = E_m = 150$ *B*, а початкові фази зсунуті на 120 º, тому $\psi_C = \psi_B - 120^\circ = 45^\circ - 120^\circ = -75^\circ$.

Приклад 2. Вольтметр *V1* в колі, зображеному на рисунку показує 60 *B*. Визначити показ вольтметра *V2*.



Розв'язок. Як видно зі схеми, навантаження симетричне, оскільки в кожній з фаз увімкнено однаковий активний і реактивний опори. У випадку з'єднання фаз зіркою і симетричному навантаженні лінійна напруга більша, ніж фазна в $\sqrt{3}$. Оскільки вольтметр *V1* увімкнено на фазну напругу U_a, а вольтметр *V2* – на лінійну U_{AB}, то показ вольтметра *V2* дорівнює $U_л = \sqrt{3}U_ф = 60\sqrt{3} = 103{,}9$ *B*.

Приклад 3. До джерела трифазної системи з лінійною напругою $U_л$ = 380 *B* і частотою *f* = 50 *Гц* підєднане рівномі-

рне навантаження, яке увімкнене за схемою зірка, з повним опором у фазі $Z_ф = 90$ *Ом* та індуктивністю L = 180 *мГн*. Визначити активну, реактивну і повну потужність, коефіцієнт потужності, діюче значення лінійного струму і напруги.

Розв'язок.

Фазна напруга рівна: $U_ф = \frac{U_л}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220$ *В.*

Фазний струм рівний: $I_ф = \frac{U_ф}{Z} = \frac{220}{90} = 2,45\ A$.

Лінійний струм при з'єднанні зіркою рівний фазному:

$$I_л = I_ф = 2,45\ A.$$

Реактивний опір у фазі:

$$X_L = \omega L = 2\pi fL = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 0,18 = 56,5\ Ом.$$

Активний опір у фазі:

$$R = \sqrt{Z^2 - X_L{}^2} = \sqrt{90^2 - 56,5^2} = 70\ Ом.$$

Коефіцієнт потужності фази: $\cos\varphi = \frac{R}{Z} = \frac{70}{90} = 0,778.$

Потужність, яку споживає навантаження:

– активна $P_ф = 3U_ф I_ф \cos\varphi$ = 3·220·2,45·0,778 = 1258 *Вт* ≈ *1,26 кВт,* або $P = \sqrt{3}U_л I_л \cos\varphi \approx 1,26$ *кВт*;

– реактивна $Q = 3U_ф I_ф \sin\varphi$ = 3·220·2,45·0,628 = 1015 *вар* ≈ 1,015 *квар,* або $Q = \sqrt{3}U_л I_л \sin\varphi \approx 1,0$ *квар*;

– повна $S = 3U_ф I_ф = 3 \cdot 220 \cdot 2,45 = 1617\ ВА \approx 1,6$ *кВА*,

або $S = \sqrt{3}U_л I_л = 1,73 \cdot 380 \cdot 2,45 \approx 1,6$ *кВА.*

Приклад 4. До чотирипровідної трифазної мережі з діючим значенням лінійної напруги 220 *В* під'єднане нерівномірне активне навантаження, яке споживає потужність у фазах P_A = 3 *кВт*, P_B = 1,8 *кВт*, P_C = 0,6 *кВт*. Визначити діюче значення струму в нейтральному проводі.

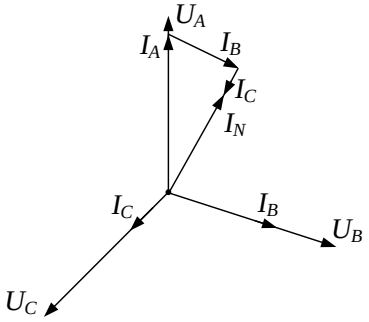
Розв'язок. Напруга в кожній фазі рівна:

$$U_ф = \frac{U_л}{\sqrt{3}} = \frac{220}{\sqrt{3}} = 127 B.$$

Струми у фазах рівні: $I_A = \frac{P_A}{U_ф} = \frac{3000}{127} = 22,4\ A$,

$$I_B = \frac{P_B}{U_ф} = \frac{1800}{127} = 14,2\ A, \quad I_C = \frac{P_C}{U_ф} = \frac{600}{127} = 4,7\ A.$$

Струм в нейтральному проводі визначаємо з векторної діаграми як суму векторів фазних струмів.



$$\overline{I}_N = \overline{I}_A + \overline{I}_B + \overline{I}_C; \qquad \overline{I}_N = 16\ A.$$

Приклад 5. До трифазної чотирипровідної мережі з діючим значенням лінійної напруги $U_Л$ = 380 *В* і частотою *f* = 50 *Гц* під'єднаний приймач енергії, який з'єднаний за схемою зірка. У фазу *А* увімкнена котушка з індуктивністю *L* = 0,18 *Гн* і активним опором R_A = 80 *Ом*, у фазу *В* – резистор з опором R_B = 69 *Ом*, у фазу *С* – конденсатор ємністю *С* = 30 *мкФ* з послідовно з'єднаним резистором з опором R_C = 40 *Ом*. Визначити діюче значення лінійних і фазних струмів, повну потужність, яку споживає навантаження.

Розв'язок. Фазна напруга $U_ф = \frac{U_л}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220\ B.$

Повний опір у фазі *A* буде рівний:

$$Z_A = \sqrt{R_A{}^2 + X_L{}^2} = \sqrt{80^2 + \left(2\pi \cdot 500 \cdot 0{,}18\right)^2} = 98 \text{ Ом};$$

у фазі *B*: $Z_B = R_B = 69 \text{ Ом}$;

у фазі *C*:

$$Z_C = \sqrt{R_C{}^2 + X_C{}^2} = \sqrt{40^2 + \left(\frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 30 \cdot 10^{-6}}\right)^2} = 110 \text{ Ом}.$$

Фазні струми будуть рівні: $I_A = \dfrac{U_\phi}{Z_A} = \dfrac{220}{98} = 2{,}25 \text{ A};$

$$I_B = \frac{U_\phi}{Z_B} = \frac{220}{69} = 3{,}2 \text{ A}; \quad I_C = \frac{U_\phi}{Z_C} = \frac{220}{110} = 2{,}0 \text{ A}.$$

Активна потужність буде рівною:

у фазі *A*: $P_A = I_A{}^2 R_A = \left(2{,}25\right)^2 \cdot 80 = 405 \text{ Вт}$;

у фазі *B*: $P_B = I_B^2 R_B = \left(3{,}2\right)^2 \cdot 69 = 704 \text{ Вт}$;

у фазі *C*: $P_C = I_C^2 R_C = \left(2{,}0\right)^2 \cdot 40 = 160 \text{ Вт}$.

$P_H = P_A + P_B + P_C = 405 + 704 + 160 = 1269 \text{ Вт}$.

Реактивна потужність буде рівною:

у фазі *A* $Q_A = I_A^2 X_L = \left(2{,}25\right)^2 \cdot 56{,}5 = 285 \text{ вар}$;

у фазі *B* $Q_B = 0$;

у фазі *C* $Q_C = -I_C^2 X_C = -\left(2{,}0\right)^2 \cdot 106 = -425 \text{ вар}$.

$Q_H = Q_A + Q_C = 285 + (-425) = -140 \text{ вар}.$

Повна потужність навантаження буде рівною:

$$S = \sqrt{P_н{}^2 + Q_н{}^2} = \sqrt{1269^2 + 140^2} = 1{,}28 \text{ кВА}.$$

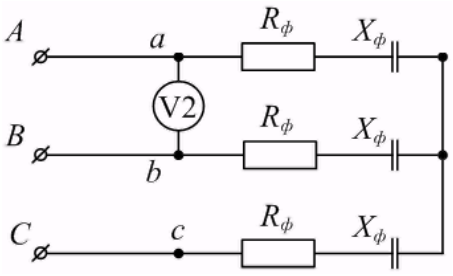
Задачі для самостійного розв'язування

Задача 1. Миттєве значення ЕРС фази *B* дорівнює $e = 150\sin\left(\omega t + 45^\circ\right)$ *B*. Визначити максимальне значення ЕРС фази *C* та її початкову фазу, якщо ці ЕРС утворюють симетричну систему.

Задача 2. Записати миттєве значення ЕРС фази *A*, якщо амплітудне значення ЕРС фази *C* дорівнює 220 *B*, а її початкова фаза $\psi_{E_C} = 150^\circ$. Ці ЕРС утворюють симетричну систему.

Задача 3. Амперметр, що увімкнено в лінійний провід фази *B* показує 5 *A*. Початкова фаза цього струму дорівнює $\psi_{I_B} = 75^\circ$. Записати миттєве значення струму фази *A*, якщо фази споживача з'єднано зіркою і навантаження симетричне.

Задача 4. Визначити фазний струм у схемі, зображеній на рисунку, якщо показ вольтметра *V2* дорівнює 150 *B*, а параметри навантаження R_ϕ = 12 *Ом*, X_ϕ = 18 *Ом*.



Відповідь: 4 A.

Задача 5. В трифазному колі фази споживача з'єднано трикутником. Амперметр у фазі *A* показує *7 A*. Визначити

діюче значення струму у лінійному проводі *B*, якщо навантаження симетричне. ***Відповідь: 12,1 А***.

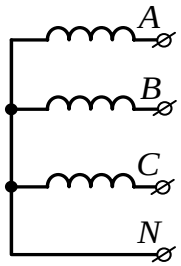
Задача 6. Миттєве значення фазної напруги споживача, фази якого з'єднано трикутником, дорівнює $u_{\phi_A} = 127\sin\left(\omega t - 60^\circ\right)$. Записати миттєве значення лінійної напруги $U_{лBC}$.

Задача 7. У трифазного споживача фази з'єднано трикутником і навантаження симетричне: R_ϕ = 9 *Ом,* X_ϕ = 15 *Ом*. Записати миттєве значення струму у лінійному проводі *A,* якщо лінійна напруга $U_л$ = 380 *B*.

Задача 8. Визначити потужність симетричного трифазного споживача, фази якого з'єднано зіркою, якщо лінійна напруга джерела $U_л$ = 220 *B*, R_ϕ = 16 *Ом,* X_ϕ = 20 *Ом*.
Відповідь: 1202 Вт.

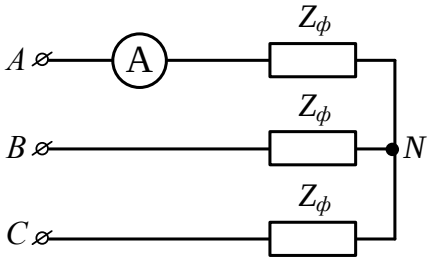
Задача 9. Фази симетричного трифазного споживача з'єднано трикутником. Повний опір фази споживача Z_ϕ = 20 *Ом*, коефіцієнт потужності $\cos\varphi = 0{,}8$. Визначити потужність, яку споживає цей споживач від джерела енергії з лінійною напругою $U_л$ = 220 *B*. ***Відповідь: 5808 Вт***.

Задача 10. Під час роботи трифазного генератора було виміряно напругу між затискачами *B* і *N*: U_{BN} = 120 *B*.



Яку величину напруги покаже вольтметр, увімкнений між затискачами *A* і *C*. ***Відповідь: 207,6 В.***

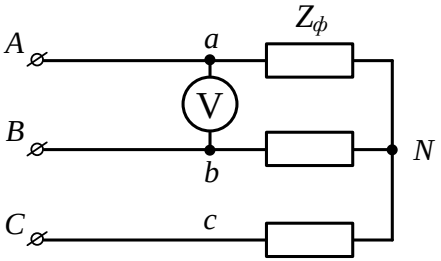
Задача 11. На рисунку зображено трифазний симетричний споживач електроенергії, фази якого з'єднано зіркою. Показ амперметра дорівнює $I = 3$ *А*. Визначити показ амперметра, якщо фази даного споживача з'єднати трикутником при незмінній напрузі.



Відповідь: 9 А.

Задача 12. В схемі попередньої задачі, обчислити показ амперметра, якщо $U_{AB} = 220$ *В*, $Z_ф = 22$ *Ом*. ***Відповідь: 5,8 А***.

Задача 13. В симетричному трифазному колі, зображеному на рисунку, обчислити показ вольтметра, якщо відомо, що $I_C = 4$ *А* , $Z_ф = 10$ *Ом*.



Відповідь: 69,2 В.

Задача 14. Потужність, яку споживає симетричне трифазне резистивне навантаження, з'єднане трикутником дорівнює $P = 1{,}2$ *кВт*. Обчислити значення лінійного струму, якщо опір фази $R_ф = 4$ *Ом*. ***Відповідь: 10 А***.

Задача 15. В симетричному трифазному колі лінійний струм $I_Л$ = 14,5 *А*. Обчислити активну потужність, яку споживає навантаження, з'єднане трикутником, якщо $R_ф$ = 8 *Ом*, $X_ф$ = 6 *Ом*. ***Відповідь: 1686 Вт***.

Задача 16. До трифазної мережі змінного струму з напругою $U_Л$ = 380 *В* увімкнено трифазний двигун, обвитки якого з'єднані трикутником. Визначити значення струму і активну потужність, які споживає двигун, якщо його активний та індуктивний опори фаз дорівнюють $R_ф$ = 6 *Ом*, $X_ф$ = 10 *Ом*. ***Відповідь: 56,37 А, 19106 Вт***.

Задача 17. До трифазного симетричного приймача з'єднаного трикутником підведена напруга *U* = 220 *В*. Опори фаз $Z_ф = R_ф$ = 220 *Ом*. Визначити усі струми при симетричному режимі та при обриві лінійного проводу фази *А*.

Задача18. Відомий струм фази I_{AB} = 4 *А*, та опір фази $R_ф$ = 55 *Ом* симетричного трифазного приймача з'єднаного трикутником. Визначити усі струми, напруги при симетричному режимі та при обриві фази *ВС*.

Задача 19. В симетричному трифазному колі лінійний струм $I_Л$ = 14,5 *А*. Обчислити активну потужність, яку споживає навантаження, з'єднане трикутником, якщо $R_ф$ = 6 *Ом*, $Z_ф$ = 8 *Ом*.

Задача 20. До трифазної чотирипровідної мережі з напругою $U_Л$ = 380 *В* увімкнуто трифазне навантаження, фази якого потужністю P_A = 320 *Вт*, P_B = 660 *Вт*, P_C = 760 *Вт* з'єднані зіркою. Визначити значення струму в лінійному проводі *С*, якщо опори фаз споживача мають тільки активний опір. ***Відповідь: 3,45 А***.

Задача 21. До трифазного симетричного приймача з'єднаного трикутником підведена напруга $U_Л$ = 220 *В*. Опори фаз $R_ф$ = 40 *Ом*, $Z_ф$ = 30 *Ом*. Визначити усі струми при обриві фази *АВ* та при симетричному режимі, активну потужність споживача.

Задача 22. Три резистори з опорами *R* = 125 *Ом* з'єднані за схемою зірка і увімкнені в трифазну чотирипровідну мережу. Струм в кожній фазі *I* = 880 *мА*. Визначити діюче значення фазної і лінійної напруги та лінійного струму, а також повну потужність, яку споживає навантаження.
Відповідь: 110 В, 190,5 В, 0,88 А, 290,4 Вт.

Задача 23. Споживач, з'єднаний за схемою зірка (навантаження рівномірне), увімкнений в трьохфазну мережу змінного струму з діючим значенням лінійної напруги $U_л$ = 380 *В*. Коефіцієнт потужності навантаження $cos\varphi$ = 0,5, струм у фазі $I_Ф$ = 22 *А*. Визначити повний, активний і реактивний опір, а також повну, активну і реактивну потужності навантаження. ***Відповідь: 5 Ом, 8,7 Ом, 10,0 Ом, 7,26 кВт, 12,6 квар, 14,5 кВА***.

Задача 24. Три індуктивні котушки з активним опором *R* = 34,2 *Ом* та індуктивним опором X_L = 23,5 *Ом* з'єднані за схемою зірка і під'єднані до джерела трифазної напруги. Активна потужність у фазі $P_Ф$ = 1,6 *кВт*. Визначити діюче значення лінійної і фазної напруги, струму у фазі, повну і реактивну потужності навантаження.
Відповідь: 488 В, 282 В, 6,8А, 5,75 кВА, 3,25 квар.

Задача 25. До джерела трифазної напруги з діючим значенням лінійної напруги $U_л$ = 380 *В* і частотою *f* = 50 *Гц* під'єднано рівномірне навантаження, яке з'єднане за схемою зірка. Діюче значення струму у фазі $I_ф$ = 1,25 *А*. Коефіцієнт потужності навантаження $cos\varphi$ = 0,45. Визначити

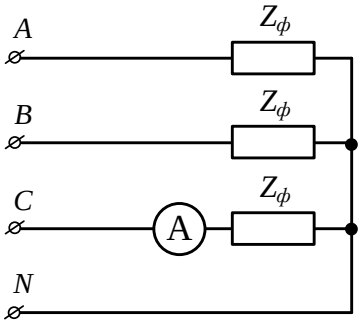
повний і активний опір навантаження, його індуктивність, а також повну споживану потужність.
Відповідь: 1796 Ом, 80,5 Ом, 0,5 Гн, 825 ВА.

Задача 26. Потужність, яку споживає симетричне трифазне навантаження, з'єднане трикутником, дорівнює $P = 1{,}2$ *кВт*. Обчислити значення лінійного струму, якщо опір фази $R_ф = 4$ *Ом*.

Задача 27. Відомі опори фаз $R_ф = 6$ *Ом*, $Z_ф = 8$ *Ом* симетричного приймача з'єднаного зіркою з нульовим проводом. Підведена лінійна напруга $U_Л = 380$ *В*. Відбулося від'єднання фази *B*. Визначити усі струми, а також активну і повну потужності приймача.

Задача 28. Відомі опори симетричного трифазного приймача фаз $R_ф = 40$ *Ом*, $X_ф = 30$ *Ом*, з'єднаного трикутником. Підведена лінійна напруга $U_Л = 220$ *В*. Визначити усі фазні та лінійні струми, активну потужність окремих фаз та реактивну потужність трифазного приймача.

Задача 29. До трифазної чотирипровідної мережі, зображеної на рисунку, увімкнуто трифазне навантаження. Амперметр показує $I = 10$ *А*. Визначити покази амперметра у випадках: 1) при перегорянні запобіжника у проводі *B*; 2) при обриві нейтрального проводу.



Запитання для самоперевірки

1. Особливості трифазної системи.
2. Види з’єднань фаз в трифазних колах.
3. Умова симетричного навантаження.
4. Співвідношення між фазними та лінійними величинами при з’єднанні зіркою.
5. Співвідношення між фазними та лінійними величинами при з’єднанні трикутником.
6. Вирази для визначення потужностей трифазного симетричного кола.
7. Призначення нульового проводу і випадки, коли його наявність є недоцільною.

Розділ 5. Трансформатори

Після вивчення даного розділу

Ви повинні знати:

1. Будову та принцип роботи трансформаторів.
2. Режими роботи трансформаторів.
2. Робочі характеристики трансформаторів.

Ви повинні вміти:

1. Розраховувати параметри обвиток трансформатора.
2. Обчислювати коефіцієнт трансформації.

Основні теоретичні відомості

Трансформатор – це статичний електромагнітний пристрій для перетворення енергії змінного струму однієї напруги в енергію іншої напруги тієї ж частоти.

Трансформатори складаються із магнітопроводів і первинних та вторинних обвиток.

Частини магнітопроводу з обвитками називають ***стержнями***, а частини магнітопроводу без обвиток – ***ярмами.***

Обвитку до якої підводять електричну енергію, називають ***первинною***, а обвитку, від якої енергія подається до споживача – ***вторинною***. Первинна і вторинна обвитки електрично ізольовані одна від одної, а електрична енергія з первинної обвитки передається у вторинну обвитку магнітним полем.

За кількістю фаз трансформатори поділяються на ***однофазні***, ***трифазні***, ***багатофазні***.

За будовою магнітопроводу розрізняють ***стержневі*** та ***броньові*** трансформатори.

За типом охолодження трансформатори діляться на: ***повітряні*** (сухі), ***олійні*** (масляні).

За призначенням розрізняють:

– ***силові трансформатори***, які перетворюють значні потужності у сотні-тисячі та більше ВА

– ***спеціальні трансформатори***, як правило малопотужні, що використовуються в схемах передачі та перетворення інформації (вимірювальні, узгоджувальні тощо).

Трансформатори бувають:

– ***підвищувальні,*** в яких вторинна напруга перевищує первинну $U_2 > U_1$,

– ***знижувальні,*** в яких первинна напруга перевищує вторинну $U_1 > U_2$.

Робота трансформаторів базується на законі електромагнітної індукції.

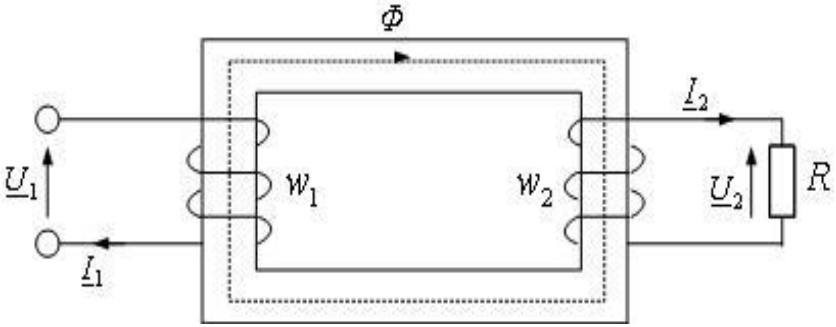


Рис.17. Схема однофазного трансформатора

Найважливішим параметром трансформатора є ***коефіцієнт трансформації n*** (або ***k***), який дорівнює відношенню напруг вторинної обмотки до первинної при неробочому режимі, тобто при $I_2 = 0$ (або відношенню вторинної ЕРС до первинної, чи кількості витків вторинної обвитки до первинної): $n = \frac{E_2}{E_1} = \frac{w_2}{w_1} = \frac{U_2}{U_1}$.

Другим важливим параметром (характеристикою) трансформатора є ***коефіцієнт корисної дії*** (ККД):

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P},$$

де $P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2$ – потужність споживача, $P_1 = P_2 + \Delta P$ – потужність на вході трансформатора, ΔP – сумарні втрати в трансформаторі.

Втрати в трансформаторі поділяються на електричні (так звані втрати в міді) і магнітні (втрати в сталі).

Третім важливим параметром трансформатора є його ***зовнішня характеристика,*** яка визначає залежність вихідної напруги U_2 від вихідного струму I_2 при незмінній підведеній напрузі U_1: $U_2 = f(I_2)$, при $U_1 = const$.

Зміну напруги у відсотках визначають за виразом:

$$\Delta U_{\%} = \beta(U_{ka} \cos \varphi_2 + U_{kp} \sin \varphi_2),$$

де $\beta = \frac{I_1}{I_{1н}} = \frac{I_2}{I_{2н}}$ – ***коефіцієнт завантаження трансформатора***, U_{ka} – активна складова напруги короткого замикання, U_{kp} – реактивна складова напруги короткого замикання.

Діючі значення ЕРС, які наводяться в первинній і вторинній обвитках рівні:

$$E_1 = 4,44 f w_1 \Phi_м, \quad E_2 = 4,44 f w_2 \Phi_м,$$

де E_1, E_2 – ЕРС первинної та вторинної обвиток, f – частота змінного струму, $\Phi_м$ – амплітудне значення магнітного потоку, w_1, w_2 – число витків первинної і вторинної обвиток.

Рівняння струмів для трансформатора має вигляд:

$$I_x = I_1 + I_2 \frac{w_2}{w_1},$$

де I_x – струм холостого ходу трансформатора, I_1, I_2 – струми первинної та вторинної обвиток, відповідно.

Нехтуючи струмом холостого ходу можна вважати, що $\frac{I_1}{I_2} = \frac{w_2}{w_1} = n$, тобто струми в обвитках трансформатора обернено пропорційні числу витків цих обмоток.

Номінальною потужністю трансформатора називають повну номінальну потужність $S_н = U_{1н} I_{1н}$, *ВА.*

Трансформатори можуть працювати в таких ***режимах***:

- робочий (номінальний);
- неробочий режим;
- режим короткого замикання.

Неробочий режим трансформатора – це такий режим, в якому на первинну обвитку подано номінальну напругу $U_{10} = U_{1н}$, а вторинна обвитка розімкнена $I_2 = 0$. Струм первинної обвитки I_0 становить (2…10) % від номінального струму. ***Коефіцієнт потужності*** трансформатора в неробочому режимі визначається за виразом: $\cos\varphi_{10} = \frac{P_{10}}{U_{1н} I_{10}}$ і становить $\cos\varphi_{10} = 0,05...0,2.$

Режим короткого замикання трансформатора – це режим, в якому вторинну обвитку замкнено накоротко, а до первинної обвитки прикладено таку напругу $U_{1к}$, при якій в обвитках трансформатора проходять струми, які дорівнюють номінальним: $I_{1к} = I_{1н}$, $I_{2к} = I_{2н}$. Напругу $U_{1к}$ називають ***напругою короткого замикання***, і визначають у відсотках від номінальної напруги: $U_{k\%} = \frac{U_k}{U_н}$ %, яка становить (4…15) %.

Приклади розв'язування задач

Приклад 1. Визначити діюче значення ЕРС первинної обвитки трансформатора з кількістю витків w_1 = 450, якщо він під'єднаний до джерела живлення з частотою 50 Гц, а магнітний потік в осерді $\Phi_м = 2{,}17 \cdot 10^{-6}$ *Вб*.

Розв'язок. Діюче значення ЕРС первинної обвитки трансформатора визначається за виразом:

$$E_1 = 4{,}44 f w_1 \Phi_м = 4{,}44 \cdot 50 \cdot 450 \cdot 2{,}17 \cdot 10^{-3} = 316{,}8 \text{ В}.$$

Приклад 2. Номінальна потужність однофазного трансформатора дорівнює 5 *кВА*. Напруги на ньому становлять 380 *В* і 120 *В*. Визначити номінальні струми первинної та вторинної обвиток трансформатора. Тепловими втратами в трансформаторі знехтувати.

Розв'язок. Потужність трансформатора $S = UI$.

Тоді струм первинної обвитки $I_1 = \dfrac{S}{U_1} = \dfrac{5000}{380} = 13{,}1$ *А*.

Струм вторинної обвитки $I_2 = \dfrac{S}{U_2} = \dfrac{5000}{220} = 22{,}7$ *А*.

Приклад 3. Трансформатор має номінальну потужність $S_н$ = 200 *ВА*. Коефіцієнт трансформації k = 4, номінальна напруга первинної обвитки $U_{1н}$ = 220 *В*. Визначити номінальні струми обвиток та номінальну напругу вторинної обвитки.

Розв'язок. Потужність трансформатора $S_н = U_{1н} I_{1н} =$ $= 200$ *ВА*. Тоді $I_{1н} = \dfrac{S_{1н}}{U_{1н}} = \dfrac{200}{220} = 0{,}909$ *А*. Номінальний струм вторинної обвитки рівний $I_{2н} = I_{1н} k = 0{,}909 \cdot 4 = 3{,}64$ *А*. Напруга вторинної обвитки рівна $U_{2н} = \dfrac{U_{1н}}{k} = \dfrac{220}{4} = 55$ *В*.

Задачі для самостійного розв'язування

Задача 1. Однофазний трансформатор з кількістю витків первинної і вторинної обвиток відповідно $w_1 = 450$, $w_2 = 250$ живиться від джерела з частотою 50 *Гц*, напругою $U_{1н} = 220$ *В*. Визначити амплітуду магнітного потоку в осерді трансформатора та ЕРС вторинної обвитки.
Відповідь: $2{,}2 \cdot 10^{-3}$ Вб, 122,2 В.

Задача 2. Визначити кількість витків вторинної обвитки трансформатора, якщо магнітний потік в осерді $\Phi_м = 2 \cdot 10^{-3}$ *Вб*, частота живлення рівна 50 *Гц*, а індукована ЕРС у вторинній обвиті $E_2 = 220$ *В*. ***Відповідь: 330 витків.***

Задача 3. Трансформатор ввімкнено в мережу напругою 3000 *В*. Напруга на затискачах його вторинної обвитки дорівнює 500 *В*. Визначити коефіцієнт трансформації і кількість витків вторинної обвитки, якщо первинна обвитка містить 1500 витків. ***Відповідь: 0,17; 255***.

Задача 4. Кількість витків первинної обвитки трансформатора дорівнює 150, а вторинної – 250, Трансформатор приєднано до мережі напругою 220 *В*. Якою буде напруга на затискачах його вторинної обвитки?
Відповідь: 367,4 В.

Задача 5. Відомі паспортні дані однофазного трансформатора $U_{1н} = 6000$ *В*, $U_{2н} = 380$ *В*, $I_{1н} = 30$ *А*. Розрахувати номінальний вторинний струм $I_{2н}$, номінальну потужність $S_н$ та коефіцієнт трансформації k.
Відповідь: 475 А, 180 кВА, 0,063.

Задача 6. Відомі паспортні дані однофазного трансформатора $U_{1н} = 3000$ *В*, $U_{2н} = 380$ *В*, $I_{1н} = 15$ *А*. Розраху-

вати номінальний вторинний струм $I_{2н}$, номінальну потужність $S_н$ та коефіцієнт трансформації k.

Задача 7. Відомі паспортні дані однофазного трансформатора $U_{1н} = 36\ В$, $U_{2н} = 220\ В$, $I_{1н} = 2\ А$. Розрахувати номінальний вторинний струм $I_{2н}$, номінальну потужність $S_н$ та коефіцієнт трансформації k.

Задача 8. Відомі паспортні дані однофазного трансформатора $U_{1н} = 6000\ В$, $U_{2н} = 380\ В$, $I_{1н} = 475\ А$. Розрахувати номінальний вторинний струм $I_{2н}$, номінальну потужність $S_н$ та коефіцієнт трансформації k.

Задача 9. Відомі паспортні дані однофазного трансформатора $U_{1н} = 110\ В$, $U_{2н} = 220\ В$, $I_{1н} = 50\ А$. Розрахувати номінальний вторинний струм $I_{2н}$, номінальну потужність $S_н$ та коефіцієнт трансформації k.

Задача 10. Однофазний трансформатор має первинну та дві вторинні обвитки. Номінальні напруги дорівнюють $U_{1н} = 10\ кВ$, $U_{2н1} = 400\ В$, $U_{2н2} = 100\ В$. Діюче значення напруги одного витка $U_{вит} = 6\ В$. Розрахувати кількість витків усіх трьох обвиток трансформатора.
Відповідь: 1600, 66, 17.

Задача 11. Для трансформатора відомі $P_{2н} = 1{,}2\ кВт$, $U_{2н} = 220\ В$, $\cos\varphi_{2н} = 0{,}8$, коефіцієнт трансформації $k = 0{,}1$. коефіцієнт корисної дії $\eta = 0{,}9$. Визначити $U_{1н}$, $I_{1н}$, P_1, $S_н$.

Задача 12. Первинна обмотка трифазного трансформатора під'єднана до мережі з лінійною напругою 380 $В$. Коефіцієнт трансформації $k = 1{,}73$, опір навантаження $Z = R = 10\ Ом$. Визначити показ вольтметра, під'єднаного до вторинної обмотки, нехтуючи активним опором обмоток трансформатора, $Z_а = Z_в = Z_с$.

Задача 13. Для трансформатора відомі $P_{2н} = 1{,}2$ *кВт*, $U_{2н} = 220$ *В*, $\cos\varphi_{2н} = 0{,}8$, коефіцієнт трансформації $k = 0{,}4$, коефіцієнт корисної дії 0,9. Визначити. $U_{1н}$, $I_{1н}$, $P_{1н}$, $S_н$.

Задача 14. Однофазний трансформатор з номінальною потужністю $S_н = 30$ *кВА* живиться напругою $U_{1н} = 380$ *В*. Визначити $I_{1н}$, $I_{2н}$, $U_{2н}$, якщо кількість витків $w_1 = 346$, $w_2 = 200$. Втратами знехтувати.

Запитання для самоперевірки

1. Яке призначення трансформатора?
2. Які основні частини трансформатора?
3. На які групи поділяються трансформатори за своїм призначенням?
4. Поясніть принцип роботи трансформатора.
5. Як визначається коефіцієнт трансформації?
6. Що таке зовнішня характеристика трансформатора?
7. Режими роботи трансформатора.

Розділ 6. Електричні машини постійного струму

Після вивчення даного розділу

Ви повинні знати:

1. Будову та принцип роботи машини постійного струму.
2. Основні характеристики машин постійного струму в режимах генератора та двигуна.

Ви повинні вміти:

1. Визначати ЕРС генератора та обертовий електромагнітний момент двигуна.
2. Здійснювати запуск двигуна постійного струму та регулювати частоту обертання його якоря.

Основні теоретичні відомості

Електрична машина – це електротехнічний пристрій, призначений для перетворення механічної енергії в електричну (***генератор електричної енергії***) або навпаки, електричної енергії в механічну (обертання вала ***електричного двигуна***).

Та ж сама електрична машина постійного струму (ЕМПС) може працювати, як в режимі генератора так і в режимі двигуна. Така властивість дістала назву ***принципу оборотності***.

Електрична машина постійного струму складається з двох основних частин: нерухомої – статора, рухомої (обертальної) – ротора.

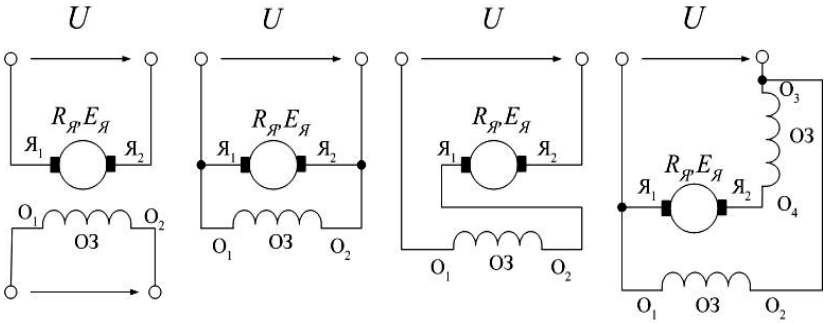
Статор складається з станини, магнітних головних і додаткових полюсів, підшипникових щитів, щіткотримачів та системи магнітопроводу. ***Станина*** виконує функції ***магнітопроводу***, тому виготовляється із ***феромагнітного*** матеріалу. ***Магнітні полюси*** призначені для утворення магнітного поля збудження машини, для чого на полюсах розташовані ***обвитки збудження*** (ОЗ), якими протікає струм збудження.

Ротор (***якір***) складається з валу, феромагнітного осердя з обвитками, колектора та підшипників. Осердя має циліндричну форму з пазами на зовнішній поверхні для обмоток якоря. Осердя виготовляється із ізольованих листів електричної сталі (подібно як магнітопровід трансформатора).

Принцип дії електричних машин постійного струму ґрунтується на ***явищі електромагнітної індукції***.

За ***способом збудження*** ЕМПС поділяються на:

- машини із ***незалежним збудженням*** (рис. 18а), в яких обвитка збудження живиться від незалежного (стороннього) джерела електричної енергії;
- машини із ***самозбудженням***.



а б в г

Рис. 18. Схеми способів збудження електричних машин постійного струму

ЕМПС із самозбудженням в свою чергу поділяються на машини:

- ***паралельного збудження*** (***шунтові***), в яких обвитка збудження під'єднана паралельно до обвитки якоря (рис. 18б);
- ***послідовного збудження*** (***серієсні***), в яких обмотка збудження під'єднана послідовно до обвиток якоря, то-

му в обвитці збудження і якорі тече однаковий струм $I = I_я = I_{зб}$ (рис. 18в);

– ***змішаного збудження*** (***компаундні***), в яких є дві обвитки збудження: одна із них під'єднується послідовно до обвитки якоря, а друга – паралельно (рис. 18г).

ЕРС ***генератора постійного струму*** визначається за формулою:

$$E = C_E \Phi n = \frac{pN}{60a} \Phi n,$$

де C_E – конструктивна стала генератора; Φ – магнітний потік; n – частота обертання ротора об/хв.; p – число пар полюсів машини, N – число провідників обвитки якоря; a – число пар паралельних віток обвитки якоря.

Напруга на клемах якоря генератора ($Я_1$, $Я_2$ на рис. 18) визначається за формулою:

$$U_Я = E - I_Я R_Я,$$

де E – ЕРС обвиток якоря; $I_Я$ – струм якоря; $R_Я$ – опір обвиток якоря.

Це рівняння називається ***рівнянням генератора***.

Струм якоря в генераторах із самозбудженням:

$$I_Я = I + I_{зб},$$

де $I_{зб}$ – струм в обвитці збудження; I – струм навантаження.

Основними ***експлуатаційними характеристиками*** генератора постійного струму є його зовнішня та регулювальна характеристики, які в значній мірі визначаються способом збудження.

Зовнішня характеристика – це залежність напруги на клемах генератора від струму навантаження (якоря) при незмінній частоті обертання ротора та незмінному опорі $R_{зб}$, тобто $U = f(I)$ при $n = const$, $R_{зб} = const$.

Регулювальна характеристика – це залежність струму збудження від струму навантаження при незмінній

частоті обертання ротора та незмінній напрузі навантаження, тобто $I_{зб} = f(I)$ при $n = const$, $U_г = const$.

Суттєвим фактором, що впливає на магнітне поле ЕМПС є реакція якоря. ***Реакція якоря*** – це вплив магнітного поля, утвореного струмом якоря, на магнітне поле утворене магнітними полюсами статора. Реакція якоря ***негативно*** впливає на роботу ЕМПС, так як порушує рівномірність розподілу магнітного поля статора, а також зменшує інтенсивність результуючого поля. Для компенсації впливу реакції якоря на роботу ЕМПС на статорі встановлюють додаткові полюси із обмотками.

Суттєво на роботу машини впливає так звана ***комутація*** – сукупність механічних, теплових та електричних процесів, що відбуваються в електричному колі ЕМПС під час перемикання щітками окремих пластин колектора.

Двигуни постійного струму залежно від способу вмикання обвиток збудження поділяються на двигуни паралельного, послідовного та змішаного збудження.

Обертальний електромагнітний момент двигуна визначається за формулою:

$$M = C_м \Phi I_Я = \frac{pN}{2\pi a} \Phi I_Я ,$$

де $C_м$ – конструктивна стала; Φ – магнітний потік; $I_Я$ – струм якоря (обвитки якоря).

Рівняння напруг для двигуна має вигляд:

$$U = E + I_Я R_Я , \qquad \text{де} \quad E_Я = C_E \Phi n , \quad C_E = \frac{pN}{60a} .$$

Це рівняння називається ***рівнянням двигуна***.

Частота обертання якоря двигуна: $n = \dfrac{U - I_Я R_Я}{C_E \Phi}$.

Пусковий струм рівний: $I_{ЯП} = \dfrac{U}{R_Я + R_П}$.

Для обмеження пускового струму послідовно в коло якоря на час пуску вмикається пусковий реостат з опором $R_П$.

Опір пускового реостату рівний: $R_П = \frac{U}{I_{ЯП}} - R_Я$,

де U – номінальна напруга, що подається на обвитку якоря або двигуна; $I_{ЯП}$ – пусковий струм якоря.

Експлуатаційні властивості двигуна визначаються його ***робочими характеристиками***, під якими розуміють залежності частоти обертання n, струму I, корисного моменту M_2 , обертового моменту M від потужності на валу двигуна P_2, тобто $n, I, M_2, M = f(P_2)$ при U, $I_{зб} = const$.

Залежність $n = f(P_2)$ називають ***швидкісною характеристикою***.

Механічною характеристикою називають залежність $n = f(M)$ при $U = const$, $I_{зб} = const$.

Частоту обертання регулюють такими способами:

1. Введенням додаткового опору в коло якоря. Тоді частота обертання буде рівна: $n = \frac{U - I_Я \left(R_Я + R_Д \right)}{C_E \Phi}$.

2. Зміною основного магнітного потоку. Регулювання здійснюється реостатом $R_р$ в колі збудження двигуна.

3. Зміною напруги в колі якоря. Цей метод застосовується лише при $I_{зб} = const$, тобто при роздільному живленні кола якоря і кола збудження – при незалежному збудженні.

До ***генератора*** підводиться ***механічна потужність*** $P_1 = M\omega$, а віддається ***електрична потужність*** $P_2 = P_{ген} = U_{ген} I$.

До ***двигуна*** підводиться ***електрична потужність*** (енергія) $P_1 = U_д I$, а віддається ***механічна потужність*** (енергія) $P_2 = M_{об}\omega = \frac{2\pi n}{60} M_{об}$.

Коефіцієнт корисної дії електричних машин постійного струму рівний:

– для генератора: $\eta = \frac{P_{2ген}}{P_1} = \frac{P_{2ген}}{P_{2ген} + \Delta P}$;

– для двигуна: $\eta = \frac{P_{2двиг}}{P_1} = \frac{P_1 - \Delta P}{P_1}$,

де ΔP – втрати потужності, які включають наступні складові: $P_{елект}$.– електричні втрати, які витрачаються на нагрівання обмоток, $P_{магн}$ – магнітні втрати – це втрати в магнітопроводі, $P_{мех}$ – механічні втрати – це втрати на тертя, а також інші $P_{дод}$ – додаткові втрати.

Приклади розв'язування задач

Приклад 1. Визначити ЕРС чотириполюсної машини постійного струму при частоті обертання n = 1000 *об/хв.*, якщо кількість провідників обвитки якоря N = 200, а число паралельних віток a = 4. Величина магнітного потоку $\Phi = 4 \cdot 10^{-2}$ *Вб*.

Розв'язок. Використовуємо вираз для ЕРС генератора:

$$E = C_E \Phi n = \frac{pN}{60a} \Phi n = \frac{2 \cdot 200}{4 \cdot 60} \cdot 4 \cdot 10^{-2} \cdot 1000 = 66{,}7 \text{ } B.$$

Приклад 2. Обчислити напругу на клемах чотириполюсного генератора паралельного збудження в неробочому режимі, якщо опір якоря $R_я$ = 1,2 *Ом,* опір обвитки збудження $R_{зб}$ = 98,8 *Ом*, а коефіцієнт машини C_E = 17. Частота обертання якоря *n = 1500 об/хв.*, а магнітний потік Φ = 0,024 *Вб*.

Розв'язок. Знаходимо ЕРС генератора:

$$E = C_E \Phi n = 17 \cdot 0{,}0024 \cdot 15000 = 612 \text{ } B.$$

При неробочому режимі для шунтового генератора:

$$I_Я = I_{зб} = \frac{E}{R_{зб} + R_Я} = \frac{612}{98,8+1,2} = 6,12\ A.$$

Цей струм буде створювати спад напруги на якорі:

$$\Delta U = R_Я I_Я = 1,2 \cdot 6,12 = 7,344\ B.$$

Напругу на клемах генератора визначаємо з рівняння генератора:

$$U = E - R_Я I_Я = 612 - 7,344 = 604,66\ B.$$

Приклад 3. Генератор паралельного збудження має такі паспортні дані: $P_н$ = 4,5 *кВт,* $U_Н$ = 220 *В;* $n_Я$ = 1000 *об/хв,* $R_Я$ = 0,65 *Ом,* $R_{зб}$ = 98 *Ом*. Обчислити струм якоря, ЕРС генератора.

Розв'язок. Потужність генератора, яку він віддає в номінальному режимі рівна: $P_H = U_H \cdot I_H$.

Обчислюємо струм навантаження:

$$I_H = \frac{P_H}{U_H} = \frac{4,5 \cdot 10^3}{220} = 20,45\ A.$$

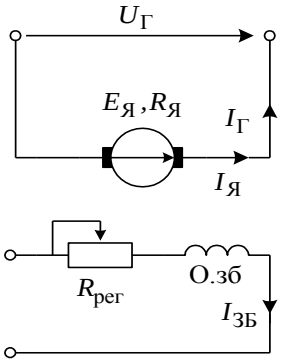
Струм збудження шунтового генератора:

$$I_{зб} = \frac{U_H}{R_{зб}} = \frac{220}{98} = 2,245\ A.$$

Струм якоря генератора знаходимо за першим законом Кірхгофа: $I_Я = I_{зб} + I_H = 2,245 + 20,45 = 22,695\ A.$

ЕРС в номінальному режимі визначаємо з рівняння генератора: $E = U_Я + I_Я R_Я = 220 + 0,65 \cdot 22,695 = 234,75\ B.$

Приклад 4. Генератор постійного струму незалежного збудження, зображений на рисунку, має наступні номінальні дані: потужність P_H = 11,5 *кВт*, напругу U_H = 230 *В*. Опір кола якоря $R_Я$ = 0,18 *Ом*. Визначити ЕРС генератора $E_Я$, та напругу U на його затискачах, якщо навантаження генератора зменшиться у два рази.



Розв'язок: Визначаємо номінальний струм генератора: $I_H = \frac{P_H}{U_H} = \frac{11,5 \cdot 10^3}{230} = 50\ A.$ ЕРС генератора визначається за формулою: $E_Я = U + I_Я R_Я = 230 + 0,18 \cdot 50 = 239\ B.$

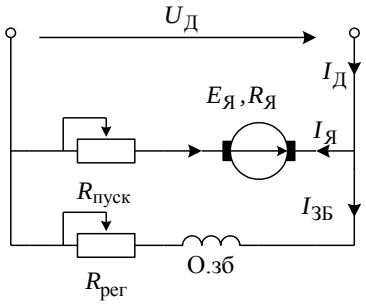
Зауважимо, що у генератора незалежного збудження $I_Г = I_Я$. При зменшенні навантаження вдвічі $I_Я = 0,5 I_H = 0,5 \cdot 50 = 25\ A$. Напруга на затискачах генератора при цьому буде рівною: $U_Г = E - I_Я R_Я = 239 - 0,18 \cdot 25 = 234,5\ B.$

Приклад 5. Номінальний струм двигуна $I_H = 36\ A$, його номінальна напруга $U_H = 220\ B$. Струм при пуску двигуна без реостата становить 450 *А*. Яким повинен бути опір пускового реостата, щоб пусковий струм не перевищував удвічі номінальний струм двигуна.

Розв'язок. Для пуску двигуна без пускового реостата $I_Я = \frac{U}{R_Я}$, звідки $R_Я = \frac{U}{I_Я} = \frac{220}{450} = 0,49\ Ом$. Для пуску двигуна з реостатом $I_Я = \frac{U}{R_Я + R_П}$, тоді $R_Я + R_П = \frac{U}{I_Я} = \frac{220}{72} = 3,05\ Ом.$

Звідси $R_П = 3,05 - R_Я = 3,05 - 0,49 = 2,56\ Ом.$

Приклад 6. Двигун постійного струму паралельного збудження, зображений на рисунку, має наступні номінальні дані: P_H = 9,375 *кВт*, U_H = 250 *В*, η = 0,75, n = 975 об/хв. Опір кола якоря $R_Я$ = 0,25 Ом. Розрахувати споживану двигуном потужність $P_{СП}$, номінальний обертовий момент M_H та величину опору пускового реостату, при якому пусковий струм якоря I не буде втричі перевищувати його номінальний струм.



Розв'язок. Визначаємо потужність, споживану двигуном: $P_Д = \frac{P_H}{\eta} = \frac{9{,}375}{0{,}75} = 12{,}5\,кВт.$

Визначаємо номінальний обертовий момент:

$$M_{об} = \frac{9{,}55P_H}{n_H} = \frac{9{,}55 \cdot 9{,}375}{975} = 91{,}8\,Нм.$$

Визначаємо номінальний струм двигуна $I_Д$:

$$I_Д = \frac{P_Д}{U_H} = \frac{12500}{250} = 50\,A.$$

Розрахуємо опір пускового реостату нехтуючи струмом збудження $I_{зб}$, приймаємо $I_Д = I_Я$. Тоді при відсутності пускового реостата пусковий струм буде рівним:

$$I_П = \frac{U}{R_Я} = \frac{250}{0{,}25} = 1000\,A.$$

За умовою пусковий струм не повинен перевищувати $I_П \le 3I_Д = 3 \cdot 50 = 150\ A$.

Із рисунку випливає, що $I_П = \dfrac{U}{R_Я + R_П}$, отже опір пускового реостата $R_п = \dfrac{U - 3I_Д R_Я}{3I_Д} = \dfrac{250 - 150 \cdot 0,25}{150} = 1,42\ Ом$.

Задачі для самостійного розв'язування

Задача 1. Визначити ЕРС обвитки якоря машини постійного струму, якщо магнітний потік $Ф = 4 \cdot 10^{-2}$ *Вб*, кількість пар полюсів $p = 2$, частота обертання $n = 1500$ *об/хв.*, кількість паралельних віток $a = 2$, кількість провідників обвитки якоря $N = 120$. ***Відповідь: 120 В***.

Задача 2. Визначити частоту обертання машини постійного струму, якщо ЕРС обвитки якоря $E = 100$ *В*, магнітний потік $Ф = 5 \cdot 10^{-2}$ *Вб*, стала машини $C_E = 2$.
Відповідь: 1 000 об/хв.

Задача 3. Знайти магнітний потік машини постійного струму, якщо $E = 100$ *В*, постійна машини $C_E = 2$, число обертів $n = 1000$ *об/хв*. ***Відповідь: $5 \cdot 10^{-2}$ Вб***.

Задача 4. Знайти частоту обертання якоря машини постійного струму, якщо $E = 100$ *В*, $N = 120$, $Ф = 5 \cdot 10^{-2}$ *Вб*, $p = 2$, $a = 2$. ***Відповідь: 1 000 об/хв***.

Задача 5. Відомо, що при частоті обертання якоря $n = 1450$ *об/хв*, $E = 120$ *В*. Знайти постійну машини C_E, якщо магнітний потік $Ф = \cdot 10^{-2}$ *Вб*. ***Відповідь: 4,13***.

Задача 6. Знайти ЕРС чотириполюсного генератора постійного струму з числом пар паралельних віток обвитки $a = 2$, числом активних провідників обвитки $N = 860$, числом пар полюсів $p = 2$, магнітним потоком $\Phi = 1{,}2 \cdot 10^{-2}$ *Вб* і частотою обертання $n = 1450$ *об/хв*. ***Відповідь: 249,4 В***.

Задача 7. ЕРС шестиполюсного генератора постійного струму $E = 210$ *В*. Визначити частоту обертання якоря, якщо магнітний потік полюса $\Phi = 2 \cdot 10^{-2}$ *Вб,* $N = 860$, $a = 3$. ***Відповідь: 1482 об/хв***.

Задача 8. Визначити напругу на затискачах генератора паралельного збудження при номінальному опорі навантаження $R_H = 2$ *Ом*, якщо ЕРС обвитки якоря $E = 118$ *В*. Опір $R_Я = 0{,}05$ *Ом***,** опір обвитки збудження $R_{зб} = 25$ *Ом.*
Відповідь: 114,9 В.

Задача 9. Визначити струми якоря і обвитки збудження генератора паралельного збудження, якщо напруга на затискачах генератора $U = 230$ *В*, опір кола збудження $R_{зб} = 29{,}5$ *Ом*, струм навантаження $I_н = 25$ *А*.
Відповідь: 32,8 А, 7,8 А.

Задача 10. Генератор паралельного збудження має такі параметри: $U_H = 115$ *В*, $I_H = 100$ *А*, $R_я = 0{,}05$ *Ом,* $R_{зб} = 35{,}9$ *Ом*. Визначити ЕРС генератора при номінальному навантаженні. ***Відповідь: 120 В.***

Задача 11. Напруга на затискачах генератора паралельного збудження $U = 230$ *В*, опір кола збудження $R_{зб} = 28{,}75$ *Ом*, струм навантаження $I_H = 25$ *А*. Визначити струм якоря і струм збудження. ***Відповідь: 33 А; 8 А***.

Задача 12. Напруга на затискачах генератора змішаного збудження $U = 115$ *В*. Опір обвитки якоря

$R_Я$ = 0,24 *Ом*, а опір послідовної обвитки збудження $R_{зб1}$ = 0,06 *Ом*. Визначити ЕРС обвитки якоря генератора і опір паралельної обвитки збудження, якщо струм навантаження генератора I = 40 *А*, а струм збудження $I_{зб}$ = 1,5 *А*.
Відповідь: 127,45 В; 76,6 Ом.

Задача 13. Визначити корисну потужність генератора змішаного збудження, якщо струм навантаження 60 *А*, напруга на затискачах генератора 230 *В*.
Відповідь: 13,8 кВт.

Задача 14. Потужність генератора постійного струму рівна P_2 = 18 *кВт*, втрати потужності в обвитці якоря $\Delta P_я$ = 1,5 *кВт*. Визначити струм якоря, якщо ЕРС дорівнює E = 243,7 *В*. ***Відповідь: 80 А***.

Задача 15. Двигун паралельного збудження має паспортні дані: U_H = 220 *В*, номінальний струм I_H = 10 *А* струм збудження $I_{зб}$ = 2 *А,* опір якоря $R_Я$ = 1 *Ом* . Визначити ЕРС обвитки якоря двигуна. ***Відповідь: 212 В***.

Задача 16. Визначити напругу живлення двигуна постійного струму, якщо номінальний струм якоря $I_Я$ = 10 *А*, ЕРС обвитки якоря при номінальній частоті обертання якоря E = *105 В*, опір кола якоря $R_Я$ = 0,5 *Ом*.
Відповідь: 110 В.

Задача 17. Двигун паралельного збудження живиться від джерела з напругою U = 110 *В*. Визначити пусковий струм двигуна без пускового реостата, якщо опір обвитки якоря $R_я$ = 2,5 *Ом*, струм в обвитці збудження $I_{зб}$ = 1 *А*.
Відповідь: 45 А.

Задача 18. Напруга живлення двигуна паралельного збудження U = 220 *В*. Пусковий струм якоря без пускового

реостата дорівнює $I_Я$ = 275 *А*. Визначити струм якоря під час роботи двигуна, якщо ЕРС обвитки якоря E = 210 *В*. ***Відповідь: 12,5 А***.

Задача 19. Двигун з паралельним збудженням живиться від джерела з напругою U = 220 *В* й має опір кола якоря $R_Я$ = 0,4 *Ом*, номінальний струм $I_Н$ = 20 *А*. Визначити пусковий струм двигуна без пускового реостата і опір пускового реостата за умови $I_П = 2{,}5I_Н$.
Відповідь: 550 А, 4 Ом.

Задача 20. Двигун паралельного збудження під'єднано до мережі з напругою U = 220 *В* і він споживає струм $I_Н$ = 33 *А*. Визначити номінальну потужність двигуна, якщо ККД дорівнює 82 %. ***Відповідь: 5953 Вт***.

Задача 21. Визначити обертовий момент двигуна постійного струму, якщо на частоті обертання n = 1000 *об/хв*., струм в обвитці якоря $I_Я$ = 43 *А,* а *ЕРС* E = 210 *В*. ***Відповідь: 83,6 Нм***.

Задача 22. Двигун постійного струму споживає струм $I_Н$ = 103 *А* від джерела живлення з напругою U = 220 *В*. Визначити обертовий момент на валу двигуна, якщо ККД дорівнює 80 %, частота обертання n = 750 *об/хв.*
Відповідь: 230 Нм.

Задача 23. Номінальна потужність двигуна постійного струму при напрузі U = 110 *В*, струмі $I_Н$ = 28,3 *А,* частоті обертання n = 1500 об/хв. дорівнює $P_Н$ = 2,5 *кВт*. Визначити ККД, обертовий момент двигуна.
Відповідь: 0,8, 15,9 Нм.

Задача 24. Визначити частоту обертання двигуна паралельного збудження в неробочому режимі, якщо

U = 220 $В$, $I_Н$ = 108 $А$, n = 10^3 *об/хв.*, $R_Я$ = 0,08 $Ом$, $I_{зб}$ = 3 $А$.
Відповідь: 1040 об/хв.

Запитання для самоперевірки

1. Будова електричної машини постійного струму.
2. Принцип дії генератора постійного струму.
3. Від яких чинників залежить електрорушійна сила генератора?
4. В чому полягає принцип оборотності електричної машини?
5. Від яких чинників залежить обертальний момент двигуна?
6. Від яких величин залежить напруга генератора?
7. Явище комутації та її впливу на роботу електричних машин постійного струму.
8. Явище реакції якоря.
9. Як можна регулювати напругу генератора?
10. Класифікація генераторів постійного струму в залежності від способу збудження.
11. Коєфіцієнт корисної дії машини постійного струму.
12. Основні переваги та недоліки двигунів постійного струму.

Розділ 7. Електричні машини змінного струму. Асинхронні двигуни

Після вивчення даного розділу

Ви повинні знати:

1. Будову та принцип роботи асинхронних двигунів.
2. Залежність електромагнітного моменту від параметрів асихронного трифазного двигуна.
3. Основні характеристики параметрів асихронного двигуна.
4. Особливості будови та роботи однофазних асинхронних двигунів.

Ви повинні вміти:

1. Визначати основні параметри асинхронного двигуна.
2. Визначати вплив параметрів асихронного трифазного двигуна на величину електромагнітного моменту.
3. Здійснювати пуск асинхронного двигуна та регулювати швидкість обертання ротора.

Основні теоретичні відомості

Асинхронні електричні машини енергетично оборотні, тобто та сама машина може працювати як в режимі генератора, так і в режимі двигуна. Асинхронні генератори не знайшли широкого застосування, тому що мають низькі експлуатаційні властивості. Асинхронні двигуни завдяки простоті, надійності та ефективності широко розповсюджені.

Асинхронний трифазний двигун (АД) – це електрична машина, яка перетворює електричну енергію трифазного струму в механічну енергію.

На рис. 19 показана конструктивна схема асинхронного трифазного двигуна.

На внутрішній поверхні циліндра статора в пазах розташована трифазна обвитка, яка вмикається в мережу трифазної напруги й створює обертове магнітне поле.

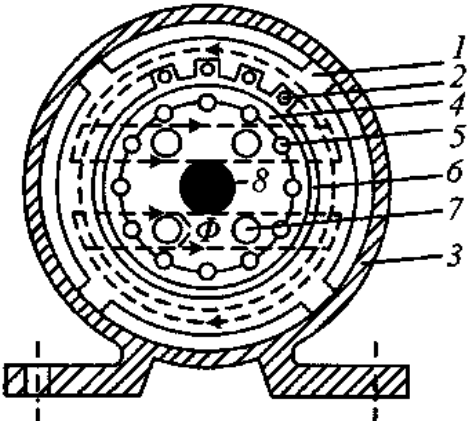


Рис. 19. Конструктивна схема асинхронного трифазного двигуна: 1 – осердя статора, набране із листів електротехнічної сталі; 2 – трифазна обвитка статора; 3 – корпус (станина) статора; 4 – осердя ротора, теж набране з листів електротехнічної сталі; 5 – обвитка ротора; 6 – повітряний проміжок між ротором і статором; 7 – вентиляційні канали; 8 – вал машини

За конструкцією обвиток ротора розрізняють асинхронні двигуни з короткозамкненим і фазним ротором.

Короткозамкнений ротор має обвитку з мідних або алюмінієвих стержнів (рис. 19, 5), укладених без ізоляції в пази на зовнішній поверхні ротора й замкнених з торців кільцями накоротко.

Фазний ротор має обвитку, виконану аналогічно трифазній обвитці статора. Вона теж трифазна (для трифазного двигуна). Кінці цих обмоток з'єднують в одну точку (з'єднання зіркою), а початки виводять до трьох контактних кілець, розташованих на валу.

Робота асинхронної машини побудована на принципі взаємодії обертового магнітного поля, що створюється трифазною обвиткою статора, з індукованим струмом в обвитці ротора. Умовою виникнення струмів ротора є асинхронність обертання магнітного поля статора і ротора, тобто $n_2 \neq n_1$, де n_1 та n_2 – швидкості обертання магнітного поля статора і ротора, відповідно.

Обертове магнітне поле – це рухоме магнітне поле, вектор магнітної індукції якого обертається в просторі. Обертове магнітне поле, вектор магнітної індукції якого не змінюється за величиною й обертається із сталою швидкістю, називається ***коловим***.

Кутова швидкість обертання магнітного поля статора пропорційна частоті струму і називається ***синхронною швидкістю***: $\Omega = 2\pi f / p$, або $n = 60f / p$, де f – частота струму, p – кількість пар полюсів n – частота обертання магнітного поля.

Обертове магнітне поле статора індукує в обвитці ротора трифазну ЕРС, яка викликає струм в провідниках ротора. Взаємодія цього струму з магнітним обертовим полем за законом Ампера спричиняє обертання ротора з частотою n_2 в напрямі обертання магнітного поля. Коли обертовий момент АД і гальмівний момент робочого механізму зрівноважуються, ротор матиме деяку усталену частоту обертання n_2, меншу від n_1.

Різниця частот обертання магнітного поля і ротора, віднесена до частоти обертання поля, називається ***ковзанням***: $s = \dfrac{n_1 - n_2}{n_1} 100\%$. Ковзання характеризує ступінь відставання ротора відносно обертового магнітного поля.

Електричні машини, в яких частота обертання ротора n_2 відрізняється від частоти обертання магнітного поля статора n_1 називаються ***асинхронними.***

Частота обертання ротора визначається за таким виразом: $n_2 = n_1(1-s) = \frac{60f}{p}(1-s)$, де n_1 – частота обертового магнітного поля, p – кількість пар полюсів кожної фази; f – частота струму.

Частоту струму обвитки ротора можна записати так: $f_2 = \frac{pn_S}{60} = \frac{p}{60}(n_1 - n_2)\frac{n_1}{n_1} = \frac{pn_1}{60}\frac{(n_1 - n_2)}{n_1} = sf_1$,

де $n_s = n_1 - n_2$ – частота обертання ротора відносно обертового магнітного поля.

Частота струму обвитки ротора в номінальному режимі роботи двигуна невелика: при s = 0,02…0,05, f = 50 *Гц* становить f_2 = 1…2,5 *Гц*.

Обертове магнітне поле індукує в кожній фазі обвиток статора і ротора ЕРС E_1 і E_2:

$$E_1 = 4,44k_1f_1W_1\Phi, \quad E_2 = 4,44k_2f_2W_2\Phi,$$

де k_1, k_2 – обвиткові коефіцієнти відповідно обвиток статора й ротора (k_1, k_2 = 0,92 – 0,96); W_1, W_2 – кількість витків відповідно фазних обвиток статора й ротора.

Діюче значення ЕРС обвитки ротора під час його обертання $E_{2s} = E_2 s$, де E_2 – ЕРС нерухомого ротора.

Відношення E_1 до E_2 для нерухомого ротора з розімкненою обвиткою ротора, так само, як у трансформаторі, називають ***коефіцієнтом трансформації***: $n = \frac{E_1}{E_2} = \frac{W_1}{W_2}\frac{k_1}{k_2}$.

Струм фазної обвитки ротора визначається за законом Ома: $I_2 = \frac{E_{2s}}{Z_2} = \frac{sE_2}{\sqrt{R_2^2 + X_{2s}^2}}$, де R_2 – ***активний опір*** фазної обвитки ротора, X_{2s} – ***реактивний індуктивний*** опір фазної обвитки ротора, $X_{2s} = \omega_2 L_2 = 2\pi f_2 L_2 = 2\pi s f_1 L_2 = sX_2$, $X_{2s} = sX_2$, тобто ***індуктивний опір*** обертового ротора до-

рівнює індуктивному опору кола ротора в нерухомому стані, помноженому на ковзання.

В асинхронних двигунах потужність від статора до ротора передається обертовим магнітним полем. Ця потужність дорівнює підведеній до двигуна потужності за відрахуванням втрат в статорі (в міді і в сталі) й називається ***електромагнітною потужністю*** P_{EM}. Вона створює обертовий момент *M,* який приводить ротор в обертання і рівна $P_{EM} = \Omega_1 M$.

Електромагнітна потужність, що передається ротору, може бути також визначена через електричні величини при нерухомому роторі: $P_{EM} = m_2 E_2 I_2 \cos\varphi_2$, де m_2 – кількість фаз обвитки ротора.

Якщо асинхронний двигун працює при сталому ковзанні (*s = const),* тоді вираз для ***обертового моменту двигуна*** запишеться: $M = KU_1^2$, де $K = C_M \dfrac{R_2/s}{(R_2/s)^2 + X_2^2}$, тобто електромагнітний момент асинхронного двигуна пропорційний квадрату напруги живлення.

Максимальному значенню обертового моменту M_{max} відповідає так зване критичне ковзання $s_k = \pm\dfrac{R_2}{X_2}$.

Знак «+» стосується режиму двигуна, знак «–» – режиму генератора. Максимальний обертовий момент рівний

$$M_{\max} = C_m U_1^2 \frac{1}{2X_2}.$$

Кратність пускового моменту $K_M = \dfrac{M_П}{M_{ном}}$,

де $M_П$ – пусковий момент двигуна.

Струм, який споживає двигун $I_1 = \dfrac{P_2}{m_1 \eta U_1 \cos\varphi_1}$.

Коефіцієнт корисної дії асинхронного двигуна рівний: $\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P}$, де P_1 – потужність, яка споживається двигуном $P_1 = m_1 E_1 I_1 \cos\varphi_1$, m_1 – кількість фаз обвитки статора, P_2 – потужність на валу двигуна (корисна потужність) $P_2 = \Omega_2 M_2$, ΔP – сумарні втрати потужності.

Робочими характеристиками асинхронного двигуна називаються залежності споживаної потужності P_1, лінійного струму обвитки статора I_1, коефіцієнта потужності $\cos\varphi$, моменту на валу M_2, ковзання s і ККД η від корисної потужності на валу P_2 при роботі з номінальною напругою і частотою.

Залежність $n = f(M)$ називають ***механічною характеристикою*** асинхронного двигуна.

Під час пуску АД з номінальною напругою живлення виникають значні пускові струми в обвитці статора, що у декілька (4 – 7) разів перевищують номінальні. Це небезпечно для двигуна й для мережі. Для покращення пускових характеристик АД штучно підвищують опір обвитки ротора, що призводить до збільшення пускового моменту та зменшення пускового струму.

Пуск асинхронних двигунів може здійснюватись за такими способами: прямий (безпосередній); перемикання обвиток статора з «трикутника» в «зірку»; автотрансформаторний; з додатковими (пусковими) опорами.

Складність регулювання частоти обертання асинхронних двигунів є їх основним недоліком. З виразу для частоти обертання $n_2 = n_1(1-s) = \frac{60f}{p}(1-s)$ випливають три можливі ***способи регулювання частоти*** асинхронного двигуна: зміною частоти струму, зміною кількості пар полюсів та зміною ковзання.

Приклади розв'язування задач

Приклад 1. Трифазний шестиполюсний асинхронний двигун з фазним ротором має такі паспортні дані: номінальна напруга U = 380/220 *В*, номінальне ковзання 4 %. Визначити частоту обертання магнітного поля, номінальну частоту обертання ротора двигуна, частоту струму ротора, схему увімкнення фазних обвиток статора, якщо АД живиться від джерела енергії з лінійною напругою 380 *В*, частотою 50 *Гц*.

Розв'язок. За кількістю пар полюсів та частотою джерела живлення визначаємо частоту обертання магнітного поля: $n_1 = \dfrac{60f}{p} = \dfrac{60 \cdot 50}{3} = 1000$ *об / хв*, $2p = 6$.

Номінальну частоту обертання ротора обчислюємо за виразом: $n_{2н} = n_1(1 - s_н) = (1 - 0,04)1000 = 960$ *об / хв*.

Частота струму ротора при номінальній частоті обертання дорівнює: $f_{2m} = sf_1 = 0,04 \cdot 50 = 2$ *Гц*.

Оскіільки фазна обвитка статора двигуна розрахована на напругу 220 *В* (U = 380/220 *В*), то для увімкнення цього двигуна до джерел;а з напругою 380 *В* фазні обвитки треба з'єднати зіркою.

Приклад 2. Асинхронний двигун має такі паспортні дані: номінальне ковзання 4 %; кількість витків фазних обмоток статора W_1 = 88 і ротора W_2 = 12; магнітний потік $\Phi_m = 1,21 \cdot 10^{-2}$ *Вб*; обвиткові коефіцієнти статора k_1 = 0,92 і ротора k_2 = 0,95; частота джерела живлення 50 *Гц*. Визначити фазні ЕРС обвиток статора і ротора, що обертається з номінальною частотою.

Розв'язок. Визначимо фазні ЕРС, що індукуються магнітним полем в обвитках статора і нерухомого ротора за виразами:

$$E_1 = 4,44 k_1 f_1 W_1 \Phi_m = 4,44 \cdot 0,92 \cdot 88 \cdot 50 \cdot 1,21^{-2} = 217,5\ B$$

$$E_2 = 4,44 k_2 f_2 W_2 \Phi_m = 4,44 \cdot 0,95 \cdot 12 \cdot 50 \cdot 1,21^{-2} = 30,6\ B.$$

ЕРС індукована у фазній обвитці ротора, що обертається з номінальною частотою: $E_{2s} = s_n E_2 = 0,04 \cdot 30,6 = 1,22\ B$.

Приклад 3. Асинхронний двигун типу АОЛ-12-6 має номінальну потужність $P_{2к} = 600\ Вт$, номінальну частоту обертання $n_{2н} = 915$ *об/хв.*, кратність максимального моменту $K_{max} = 2,0$. Визначити номінальне ковзання двигуна, номінальний момент і електромагнітну потужність, якщо двигун живиться від джерела з частотою 50 *Гц*.

Розв'язок. Синхронна швидкість обертання магнітного поля дорівнює:

$$\Omega_1 = \frac{2\pi f_1}{p} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 50}{3} = 104,67 \quad рад/с,$$

де p = 3 – кількість пар полюсів взято на підставі типу двигуна АОЛ-12-6, остання цифра якого дорівнює кількості полюсів $2p = 6$. Кутову швидкість обертання ротора обчислюємо як: $\Omega_{2н} = \frac{\pi n_{2н}}{30} = \frac{3,14 \cdot 915}{30} = 95,77 \ \ рад/с$.

Номінальний момент двигуна визначаємо за виразом:

$$M_H = \frac{P_{2H}}{\Omega_{2H}} = \frac{600}{95,77} = 6,26\ Нм.$$

Тоді електромагнітна потужність двигуна дорівнює:

$$P_{EM} = \Omega_1 M_H = 6,26 \cdot 104,67 = 655,2\ Вт.$$

Номінальне ковзання двигуна:

$$S_H = \frac{\Omega_1 - \Omega_{2H}}{\Omega_1} = \frac{104,67 - 95,77}{104,67} = 0,085.$$

Приклад 4. Трифазний асинхронний двигун має наступні номінальні дані: потужність на валу $P_{2H} = 3,0\ кВт$, коефіцієнт потужності $\cos\varphi = 0,8$, частота обертання рото-

ра n_2 = 1410 *об/хв*, коефіцієнт корисної дії η = 0,75, кратність максимального моменту K_{max} = 2,2, кратність пускового струму $K_П$ = 3. Напруга живлення U_H = 380 *В*, частота мережі f = 50 *Гц*. Визначити номінальний максимальний момент, номінальний та пусковий струми, кількість пар полюсів, синхронну швидкість та номінальне ковзання.

Розв'язок. Визначаємо номінальний момент двигуна:

$$M_H = \frac{9,55 \cdot P_{2H}}{n_2} = \frac{9,55 \cdot 3000}{1410} = 20,32\ Нм .$$

Визначаємо максимальний момент:

$$M_{max} = K_{max} \cdot M_H = 2,2 \cdot 20,32 = 44,7\ Нм .$$

Визначаємо кількість пар полюсів: $p = \frac{60 f}{n_2} = \frac{60 \cdot 50}{1410} = 2$.

Обчислимо синхронну швидкість (частоту обертання) поля статора: $n_0 = 60 \frac{f}{p} = \frac{60 \cdot 50}{2} = 1500\ об/хв$.

Обчислимо номінальне ковзання:

$$S_H = \frac{n_0 - n_2}{n_0} = \frac{1500 - 1410}{1500} = 0,16 .$$

Задачі для самостійного розв'язування

Задача 1. Ротор асинхронного трифазного двигуна 4АА63А4 обертається з частотою 1450 *об/хв*. Визначити ковзання і частоту струму обвитки ротора, якщо частота джерела живлення 50 *Гц*. ***Відповідь: 0,033, 1,66 Гц.***

Задача 2. Трифазний двополюсний асинхронний двигун при номінальному навантаженні має ковзання 4 %. Визначити номінальну частоту обертання ротора, якщо частота джерела живлення 50 *Гц*. ***Відповідь: 2 880 об/хв***.

Задача 3. Трифазний асинхронний двигун з фазним ротором обертається з частотою n_2 = 1440 *об/хв*. Визначити кількість пар полюсів і ковзання двигуна, якщо частота обертання магнітного поля n_1 = 1500 *об/хв*. ***Відповідь: 2, 0,04.***

Задача 4. Визначити ЕРС, індуковані в фазах обвитки статора і ротора асинхронного двигуна, при нерухомому роторі і при обертанні ротора з ковзанням s = 0,025. Паспортні дані асинхронного двигуна: кількість витків фазних обвиток статора W_1 = 360 і ротора W_2 = 30; магнітний потік $\Phi_m = 0{,}4 \cdot 10^{-2}$ *Вб;* частота джерела живлення 50 *Гц*. Обвиткові коефіцієнти статора і ротора $k_1 = k_2 = 1$.
Відповідь: 319,7 В, 26,6 В, 0,66 В.

Задача 5. Трифазний асинхронний двигун споживає від джерела живлення енергію потужністю 19,3 *кВт*. Визначити ККД двигуна, якщо сумарні втрати в ньому становлять *2 300 Вт*. ***Відповідь: 88 %***.

Задача 6. Трифазний асинхронний двигун з фазним ротором МТ-42-8 споживає від джерела потужність P_1 = 19,4 *кВт* при струмі $I_{1л}$ = 73,8 *А* і напрузі $U_{1л}$ = 220 *В*. Визначити ККД і коефіцієнт потужності двигуна, якщо його потужність на валу P_2 = 16 *кВт*. ***Відповідь: 82,5 %, 0,69***.

Задача 7. Ротор асинхронного двигуна ВАО-72-4 обертається з частотою $n_{2н}$= 435 *об/хв.* і споживає енергію потужністю P_1=27,47 *кВт*. Визначити номінальний момент на валу ротора, електромагнітну потужність, втрати потужності, якщо ККД двигуна 91 %, частота джерела живлення 50 *Гц*. ***Відповідь: 166,4 Нм, Р = 26124,8 Вт, 2,47 кВт.***

Задача 8. Асинхронний двигун МТ-63-10 має такі паспортні дані: потужність $P_{2н}$ = 60 *кВт*; напруга U_1 = 380/220 *В*; частоту обертання $n_{2н}$ = 577 *об/хв*; коефіцієнт потужності

$cos\varphi_{lH}$ = 0,77; ККД η = 0,885. Визначити номінальне ковзання, обертовий момент, споживану потужність, струм в колі статора при з'єднанні фаз зіркою.
Відповідь: 3,83 %; 993 Нм, 67797 Вт, 133 А.

Задача 9. Асинхронний двигун споживає від джерела потужність P_1 = 19,1 *кВт*. Втрати потужності в обвитці та магнітопроводі статора становлять 1,74 *кВт*. Визначити електромагнітну потужність, потужність на валу двигуна, втрати в роторі, якщо ковзання s = 3,3 %, ККД η = 88 %.
Відповідь: 17 360 Вт, 16828 Вт, 552 Вт.

Задача 10. Асинхронний двигун увімкнений до джерела з напругою $U_{1л}$ = 660 *В* і розвиває обертовий момент M = 390 *Нм* при частоті обертання n_2 = 980 *об/хв*. Визначити потужність на валі двигуна, ККД, якщо фази статора з'єднано трикутником, струм в колі статора $I_{1ф}$ = 26 *А*, коефіцієнт потужності $cos\varphi_1$ = 0,91. ***Відповідь: 40 кВт, 0,85***.

Задача 11. Трифазний асинхронний двигун АО2-92-8 з короткозамкненим ротором має потужність $P_{2н}$ = 55 *кВт*, напругу $U_{1л}$ = 380 *В*, фазні обмотки статора з'єднані зіркою, частота обертання ротора $n_{2н}$ = 740 *об/хв*., коефіцієнт потужності cosφ = 0,9, ККД η = 0,925, кратність пускового струму K_M = 5. Визначити номінальний момент на валу двигуна, номінальний і пусковий струми.
Відповідь: 710 Нм, 100,5 А, 502,5 А.

Задача 12. Крановий асинхронний двигун з фазним ротором має такі паспортні дані: потужність $P_{2н}$ = 22 *кВт*, напругу U = 380/220 *В*, частоту обертання $n_{2н}$ = 960 *об/хв*., коефіцієнт потужності $cos\varphi$ = 0,73, кратність максимального моменту K_{max} = 2,8. Визначити критичне ковзання, частоту обертання при максимальному моменті, номіналь-

ний і максимальний обертовий моменти. ***Відповідь: 21,66 %, 783,4 %, 218,8 Нм, 612,8 Нм***.

Задача 13. Трифазний асинхронний двигун АО2-82-6 живиться від джерела напругою U_1 = 380 В і споживає потужність P_{1H} = 43716 *Вт* при коефіцієнті потужності $cos\varphi_H$ = 0,91. Сумарні втрати в двигуні 3716 *Вт*, ковзання s_H = 2 %. Визначити потужність на валу двигуна, ККД, лінійний струм, частоти обертання магнітного поля і ротора.
Відповідь: 40000 Вт, 0,91, 73 А, 1000 об/хв., 980 об/хв.

Задача 14. Асинхронний трифазний двигун АОЛ2-32-6 під'єднано до джерела з напругою U_{1H} = 220 В при з'єднанні обвитки статора за схемою трикутника. Він споживає струм $I_{1л}$ = 9,24 *А* при ККД 81 %, коефіцієнті потужності $cos\varphi_H$ = 0,77, частота обертання ротора n_{2H} = 950 *об/хв*. Визначити споживану потужність, потужність на валу двигуна, сумарні втрати потужності, номінальний момент.
Відповідь: 2707,9 Вт, 2193,4 Вт, 514,5 Вт, 22,15 Нм.

Задача 15. Трифазний шестиполюсний асинхронний двигун споживає потужність P_1 = 6,7 *кВт* при напрузі $U_{1л}$ = 380 *В* і струмі $I_{1л}$ = 15 *А*. Визначити частоту обертання ротора, корисну потужність, коефіцієнт потужності і ККД, якщо номінальний момент M_{2H} = *49,2 Нм*, ковзання s_H = 3 %, частота струму f = 50 *Гц*.
Відповідь: 970 об/хв., 5 кВт, 0,68, 85 %.

Запитання для самоперевірки

1. Яка будова асинхронних машин?
2. Які є типи роторів асинхронних двигунів? Чим вони відрізняються?
3. Поясніть принцип роботи асинхронного трифазного двигуна.
4. Чому двигун називається асинхронним?

5. Яка величина характеризує асинхронність двигуна?
6. Від яких параметрів двигуна залежить його електромагнітний момент?
7. Якими способами здійснюють пуск асинхронних двигунів?
8. Якими способами регулюють швидкість обертання ротора асинхронного двигуна?
9. В яких режимах може працювати асинхронна машина?

Частина ІІ. ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ

Розділ 1. Чисельний експеримент

Розрахункова робота № 1

Розрахунок послідовного з'єднання резистора та котушки індуктивності

Коло (рис. 20) містить послідовно з'єднані резистор R = 30 *Ом* та ідеальну котушку, індуктивність якої L = 63,7 *мГн*. До затискачів кола підведена напруга U = 220 *В*, з частотою f = 100 *Гц*.

Визначити реактивний X_L та повний Z опори кола, струм (показ амперметра), напруги на елементах U_R, U_L, активну P, реактивну Q та повну S потужності, а також коефіцієнт потужності cos φ та кут φ. Побудувати векторну діаграму напруг.

Ціна поділки амперметра рівна $C_a = I_{ном.}/n$, де $I_{ном.}$ – номінальний струм; n – кількість поділок на шкалі амперметра.

Проведення розрахунків

Визначимо опори кола.

Реактивний опір:

$$X_L = \omega L = 2\pi fL = 6,28 \cdot 100 \cdot 63,7 \cdot 10^{-3} = 40,0 \text{ Ом}.$$

Повний опір: $Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} = \sqrt{30^2 + 40^2} = 50,0 \text{ Ом}.$

Струм у колі: $I = \dfrac{U}{Z} = \dfrac{220}{50} = 4,4 \text{ А}.$

Показання амперметра: $I = C_a \cdot n$.

Напруга на резисторі: $U_R = R \cdot I = 30 \cdot 4,4 = 132 \text{ В}$.

Напруга на котушці: $U_L = X_L \cdot I = 40 \cdot 4,4 = 156 \text{ В}$.

Сумарна напруга на двох елементах повинна дорівнювати підведеній: $U = \sqrt{U_R^2 + U_L^2} = \sqrt{132^2 + 156^2} = 220 \text{ В}$.

Активна потужність: $P = U_R I = 132 \cdot 4,4 \cong 580$ *Вт*.

Реактивна потужність: $Q = U_L I = 156 \cdot 4,4 = 686$ *ВАр*.

Повна потужність: $S = UI = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{580^2 + 686^2} = 968$ *ВА*.

Коефіцієнт потужності: $\cos\varphi = \dfrac{P}{S} = \dfrac{580}{968} = 0,6$.

Кут зсуву фаз між напругою та струмом: $\varphi = arctg\varphi \cong 53°$.

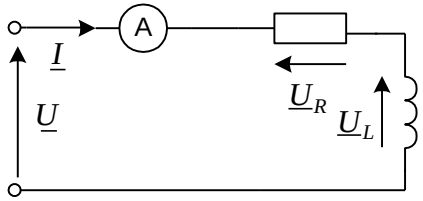


Рис. 20

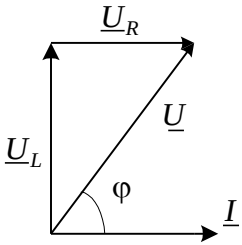


Рис. 21

Векторна діаграма показана на рис. 21.

Примітка. Амперметр має границю вимірювання 5 *А* та 150 поділок, тобто ціна поділки $C_\alpha = \dfrac{I_{ном}}{n} = \dfrac{5}{150} = 0,033$ $A/под$.

Розрахункова робота № 2

Розрахунок послідовного з'єднання резистора та конденсатора без втрат

В колі показаному на рис. 22 показання амперметра, що вимірює діюче значення, складає n = 30 поділок, при цьому амперметр має межу вимірювань 5 *А*, та уся шкала приладу містить 50 поділок. Відомо, що R = 40 *Ом*, $C = 11,1 \cdot 10^{-5}$ *Ф*. Частота живлення f = 50 *Гц*. Визначити реактивний X_c та повний Z опори кола, показання усіх трьох вольтметрів, що вимірюють діючі значення, активну P, реактивну Q та повну S потужності кола, а також коефіцієнт

потужності $\cos\varphi$ та кут зсуву фаз φ між підведеною напругою та струмом. Побудувати векторну діаграму напруг.

Проведення розрахунків

Визначаємо опори кола.

Реактивний ємнісний опір:

$$X_c = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2\cdot 3.14\cdot 50\cdot 11.1\cdot 10^{-5}} = 30 \ Ом.$$

Повний опір: $Z = \sqrt{R^2 + X_c{}^2} = \sqrt{40^2 + 30^2}\,50 \ Ом.$

За показаннями амперметра визначаємо струм:

$$I = n\cdot C_a = 30\cdot\frac{5}{50} = 3 \ A.$$

Обчислюємо напруги: $U_R = R\cdot I = 40\cdot 3 = 120 \ B,$

$U_C = X_C\cdot I = 30\cdot 3 = 90 \ B, \quad U = Z\cdot I = 50\cdot 3 = 150 \ B.$

Таким чином показання вольтметра V_1 дорівнюють 120 *B*, V_2 відповідно 90 *B* і V_0 відповідно 150 *B*.

Активна потужність: $P = U_R\cdot I = R\cdot I^2 = 40\cdot 3^2 = 360 \ Вт.$

Реактивна потужність $Q = U_C\cdot I = X_C\cdot I^2 = 30\cdot 3^2 = 270 \ ВАр.$

Повна потужність $S = U\cdot I = Z\cdot I^2 = 50\cdot 3^2 = 450 \ ВА.$

$$\cos\varphi = \frac{P}{S} = \frac{360}{450} = 0{,}8; \qquad \varphi = \arccos\varphi \cong 37°.$$

Векторна діаграма показана на рис. 23.

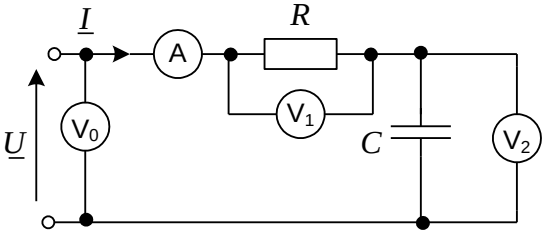


Рис. 22

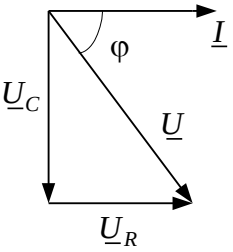


Рис.23

Розрахункова робота № 3

Розрахунок послідовного з'єднання резистора, конденсатора, котушки індуктивності

В колі зображеному на рис. 24 відомо що L = 0,2 *Гн*, C = 31,4 *мкФ*, R = 60 *Ом*. Діюче значення підведеної напруги U = 36 *В*, частота живлення f = 50 *Гц*.

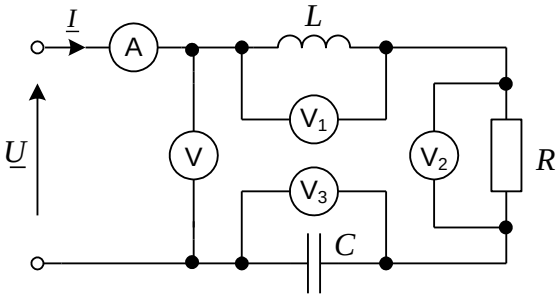


Рис. 24

Обчислити реактивні ємнісний X_C, індуктивний X_L та загальний X опори; повний опір кола Z, діюче значення струму, показання усіх приладів; активну P, реактивну Q та повну S потужності, а також cos φ та кут φ. Побудувати векторні діаграми напруг, трикутники опорів та потужностей.

Проведення розрахунків

Визначаємо опори кола.

Реактивний ємнісний:

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2 \cdot 3{,}14 \cdot 50 \cdot 31{,}4 \cdot 10^{-6}} = 101{,}4 \ Ом.$$

Реактивний індуктивний:

$$X_L = 2\pi fL = 2 \cdot 3{,}14 \cdot 50 \cdot 0{,}2 = 62{,}8 \ Ом.$$

Загальний реактивний:

$$X = X_L - X_C = 62{,}8 - 101{,}4 = -38{,}6 \ Ом.$$

Зауважимо, що загальний реактивний опір в цій задачі є від'ємний, тобто коло носить ємнісний характер.

Повний опір кола $Z = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{60^2 + (-38,6)^2} \cong 71$ *Ом.*

Коефіцієнт потужності $\cos\varphi = \frac{R}{Z} = \frac{60}{71} = 0,857$,

а кут $\varphi = arctg\frac{-X}{R} = -59°$, кут від'ємний оскільки $X < 0$.

Діюче значення струму $I = \frac{U}{Z} = \frac{36}{71} = 0,507$ *A.*

$U_L = X_L \cdot I = 62,8 \cdot 0,507 = 31,84$ *B*.

$U_R = R \cdot I = 60 \cdot 0,507 = 30,42$ *B.*

$U_C = X_C \cdot I = 101,4 \cdot 0,507 = 51,41$ *B.*

Покази приладів: амперметр *A*: I = 0,507 *A*, вольтметр V_1: U_1 = 31,84 *B*, вольтметр V_2: U_2 = 30,42 *B*, вольтметр V_3: U_3 51,41 *B*, вольтметр *V* – 36 *B*, відповідно.

Також зауважимо, що напруга на реактивному елементі (в нашому випадку конденсаторі) перевищує підведену, таке явище дістало назву амплітудного резонансу.

Обчислюємо потужності.

Активна: $P = R \cdot I^2 = 60 \cdot (0,507)^2 = 15,42$ *Вт*.

Реактивна: $Q = X \cdot I^2 = -38,6 \cdot (0,507)^2 = -9,92$ *ВАр.*

Повна: $S = Z \cdot I^2 = 71 \cdot (0,507)^2 = 18,25$ *ВА.*

Векторна діаграма напруг та трикутник опорів наведені на рис. 25.

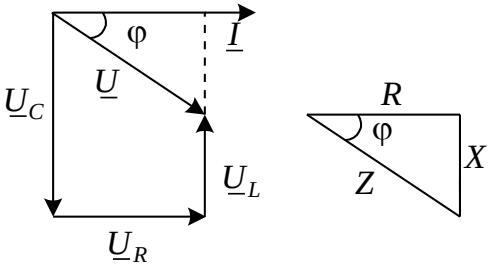


Рис. 25

Розрахункова робота № 4

Розрахунок паралельного з'єднання резистора, конденсатора та котушки індуктивності

До резистора R, через який при підведеній напрузі U = 40 В протікає струм I = 0,4 А. (рис. 26), під'єднаний паралельно конденсатор С, опір якого X_C = 133,3 Ом (рис. 27). Надалі до цих елементів паралельно під'єднана котушка L, опір якої X_L = 66,65 Ом (рис. 28).

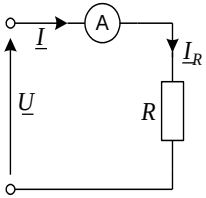


Рис. 26

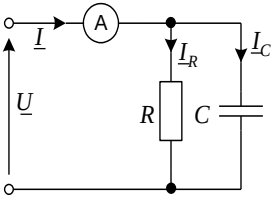


Рис. 27

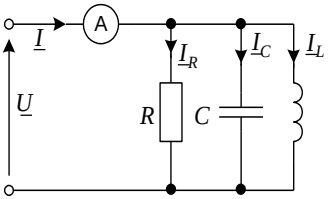


Рис. 28

Для усіх трьох випадків обчислити вхідну провідність $Y_{вх.}$ та коефіцієнт потужності $\cos\varphi_{вх.}$; струм I на вході кола; активну, реактивну та повну потужності кола, а також побудувати векторні діаграми струмів, трикутники потужностей та провідностей.

Проведення розрахунків

Для схеми на рис. 26.

Вхідна провідність:

$$Y = \sqrt{G^2 + B^2} = \frac{I}{U} = \frac{1}{R} = G = \frac{0,4}{40} = 0,01 Ом^{-1}.$$

Коефіцієнт потужності $\cos\varphi_{вх.} = \frac{G}{Y} = 1$, струм на вході кола $I = 0,4\ A$.

Активна потужність

$$P = R \cdot I^2 = G \cdot U^2 = 0,01 \cdot 40^2 = 16\ Вт.$$

Реактивна потужність $Q = X \cdot I^2 = B \cdot U^2 = 0\,BAp,$ бо $B = 0.$

Повна потужність $S = U \cdot I = 40 \cdot 0,4 = 16\ BA.$

Векторна діаграма зображена на рис. 29.

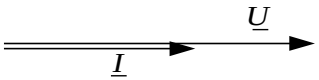


Рис. 29

Оскільки реактивна провідність, відповідно і реактивна потужність дорівнюють нулеві, то відповідні трикутники провідностей та потужностей перетворюються в прямолінійні відрізки.

Для схеми на рис.27.

Вхідна провідність: $Y_{вх.} = \sqrt{G^2 + B_C{}^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{R}\right)^2 + \left(\frac{1}{X_C}\right)^2} =$

$$= \sqrt{(0,01)^2 + \left(\frac{1}{133,3}\right)^2} = 0,0125\ Ом^{-1}.$$

Коефіцієнт потужності $\cos\varphi_{вх.} = \frac{G}{Y} = \frac{0,01}{0,0125} = 0,8.$

Струм конденсатора $I = B_C \cdot U = \frac{1}{133,3} \cdot 40 = 0,3\ A.$

Струм на вході кола $I = Y_{вх.} \cdot U = 0,0125 \cdot 40 = 0,5\ A.$

Активна потужність $P = G \cdot U^2 = 0,01 \cdot 40^2 = 16\ Вт.$

Реактивна потужність $Q = B \cdot U^2 = \frac{1}{133,3} \cdot 40^2 = 12\ BAp.$

Повна потужність $S = U \cdot I = \sqrt{P^2 + Q^2} = 40 \cdot 0,5 =$

$= 20\ BA = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{16^2 + 12^2} = 20\ BA.$

Векторна діаграма струмів показана на рис. 30, трикутники провідностей та потужностей показано на рис. 31 та 32 відповідно.

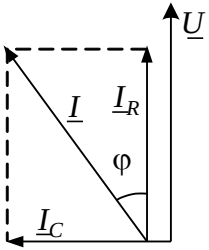


Рис. 30

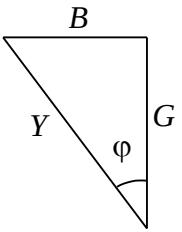


Рис. 31

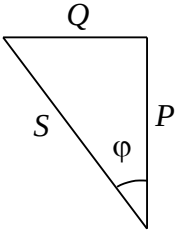


Рис. 32

Для схеми на рисунок 28.

Вхідна провідність:

$$Y_{вх.} = \sqrt{G^2 + (B_L - B_C)^2} = \sqrt{(0,01)^2 + \left(\frac{1}{66,65} - \frac{1}{133,3}\right)^2} = 0,0125\ Ом^{-1}.$$

Коефіцієнт потужності: $\cos\varphi_{вх.} = \frac{G}{Y} = \frac{0,01}{0,0125} = 0,8.$

Струм котушки: $I_L = B_L \cdot U = \frac{1}{66,65} \cdot 40 = 0,6\ A.$

Струм на вході кола: $I = Y_{вх.} \cdot U = 0,0125 \cdot 40 = 0,5\ A.$

Активна потужність: $P = G \cdot U^2 = 16\ Вт.$

Реактивна потужність:

$$Q = (B_L - B_C) \cdot U^2 = 0,075 \cdot 40^2 = 12\ ВАр.$$

Повна потужність:

$$S = U \cdot I = 40 \cdot 0.5 = 20 ВА.$$

Векторна діаграма струмів показана на рис. 33, трикутники провідності та потужності показано на рис. 34 та 35 відповідно.

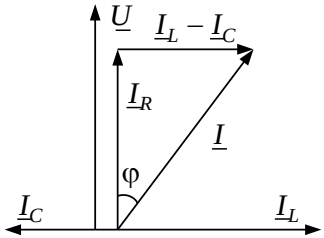


Рис. 33

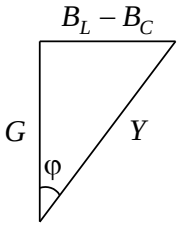


Рис. 34

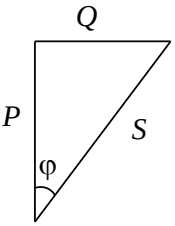


Рис. 35

Розрахункова робота № 5

Розрахунок робочих характеристик електричних машин

1. Генератор постійного струму незалежного збудження (рис. 36) має наступні номінальні дані: потужність $P_{ном}$ = 11,5 *кВт*, напругу $U_{ном}$ = 230 *В*. Опір кола якоря $R_я$ = 0,18 *Ом*. Визначити ЕРС генератора $E_я$, та напругу U на його затискачах, якщо навантаження генератора зменшиться у два рази.

Проведення розрахунків

Визначаємо номінальний струм генератора: $I_{ном} = P_{ном} / U_{ном} = 11500/230 = 50$ *А*.

ЕРС генератора визначається за формулою: $E_Я = U + R_Я I_Я = 230 + 0{,}18 \cdot 50 = 239$ *В*.

Зауважимо, що у генератора незалежного збудження $I_Г = I_Я$.

При зменшенні навантаження вдвічі $I_Я = 0{,}5\ I_{ном} = 0{,}5 \cdot 50 = 25$ *А*. Напруга на затискачах генератора при цьому буде :

$$U_Г = E - R_Я I_Я = 239 - 0{,}18 \cdot 25 = 234{,}5\ В\ .$$

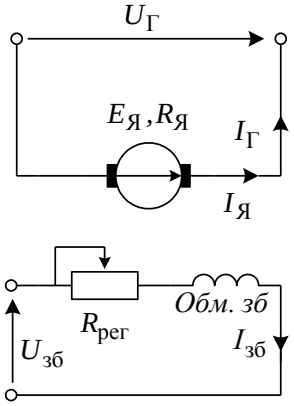


Рис. 36

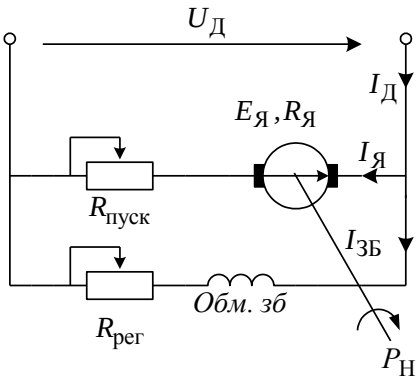


Рис. 37

2. Двигун постійного струму паралельного збудження (рис. 37), має наступні номінальні дані: $P_Н$ = 9,375 *кВт*, $U_Н$ = 250 *В*, коефіцієнт корисної дії η = 0,75, частоту обертання $n_Н$ = 975 *об/хв*. Опір кола якоря $R_Я$ = 0,25 *Ом*. Розрахувати споживану двигуном потужність $P_Н$, номінальний обертовий момент $M_Н$ та величину опору пускового реостату, при якому пусковий струм якоря $I_{ЯП}$ не буде втричі перевищувати його номінальний струм, тобто $I_{ЯП} \le 3 I_{ЯН}$.

Проведення розрахунків

Визначаємо потужність, споживану двигуном:

$$P_Д = \frac{P_Н}{\eta_Н} = \frac{9{,}375}{0{,}75} = 12{,}5\ кВт.$$

Визначаємо номінальний обертовий момент:

$$M_{об} = \frac{9{,}55 P_Н}{n_Н} = \frac{9{,}55 \cdot 9{,}375}{975} = 91{,}8\ Н \cdot м\ .$$

Визначаємо номінальний струм двигуна $I_Д$:

$$I_д = \frac{P_д}{U_н} = \frac{12500}{250} = 50\,A.$$

Розрахуємо опір пускового реостату нехтуючи струмом збудження $I_{зб}$. Приймаємо, що $I_Д = I_Я$, тоді при відсутності пускового реостата:

$$I_п = \frac{U}{R_я} = \frac{250}{0,25} = 1000\,A.$$

За умовою пусковий струм не повинен перевищувати значення $3I_{ЯН}$: $I_{ЯП} \le 3I_{ЯН} = 3 \cdot 50 = 150\ A$.

Із рис. 37 випливає, що в момент пуску $I_П = \frac{U}{R_Я + R_П}$, а опір пускового реостата $R_П$ знаходимо з рівняння двигуна $U_Д = E + (R_Я + R_П)I_Я$:

$$R_П = \frac{U - 3I_д R_я}{3I_д} = \frac{250 - 150 \cdot 0,25}{150} = 1,42\ Ом\ .$$

3. Трифазний асинхронний двигун має наступні номінальні дані. Потужність на валу $P_Н = 3,0$ *кВт*, коефіцієнт потужності $\cos\varphi = 0,8$, частота обертання ротора $n_2 = 1410$ *об/хв*, коефіцієнт корисної дії $\eta = 0,75$, кратність максимального моменту *Кмакс* = 2,2, кратність пускового струму $K_М = 3$. Напруга живлення $U_Н = 380\ B$, частота мережі $f = 50$ *Гц*.

Визначити номінальний максимальний момент, номінальний та пусковий струми, кількість пар полюсів, синхронну швидкість та номінальне ковзання.

Проведення розрахунків

Визначаємо номінальний момент двигуна:

$$M_Н = \frac{9,55 \cdot P_Н}{n_2} = \frac{9,55 \cdot 3000}{1410} = 20,32\,Н \cdot м\,.$$

Визначаємо максимальний момент:

Ммакс = Кмакс · Мном = 2,2 · 20,32 = 44,7 *Н · м* .

Визначаємо кількість пар полюсів із співвідношення $n_2 = \frac{60f}{p}$: $p = \frac{60f}{n_2} = \frac{60 \cdot 50}{1410} = 2$.

Обчислимо синхронну швидкість (частота обертання) поля статора: $n_0 = 60\frac{f}{p} = \frac{60 \cdot 50}{2} = 1500$ *об / хв.*

Обчислимо номінальне ковзання:

$$S_H = \frac{n_0 - n_2}{n_0} = \frac{1500 - 1410}{1500} = 0{,}16.$$

Розрахуємо споживану двигуном потужність:

$$P_Д = \frac{P_H}{\eta} = \frac{3{,}00}{0{,}75} = 4{,}0 \ кВт.$$

Обчислимо номінальний струм двигуна із співвідношення $P_Д = \sqrt{3} U_H I_H \cos\varphi$:

$$I_H = \frac{P_Д}{\sqrt{3} U_H cos\varphi} = \frac{4000}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0{,}8} = 7{,}6 \ A.$$

Пусковий струм двигуна:

$$I_П = 3 \cdot I_H = 3 \cdot 7{,}6 = 22{,}8 \ A.$$

Розділ 2. Фізичний експеримент

Лабораторна робота № 1

Вивчення рівнянь Кірхгофа в електричному колі постійного струму

Мета роботи: Експериментальна перевірка першого та другого законів Кірхгофа.

Програма роботи.

1. Ознайомитись із робочою схемою, перевірити наявність необхідних для виконання роботи елементів кола (джерела живлення, резисторів та вимірювальних приладів). Визначити ціну поділок вимірювальних приладів.

2. Скласти електричне коло за схемою на рис. 38.

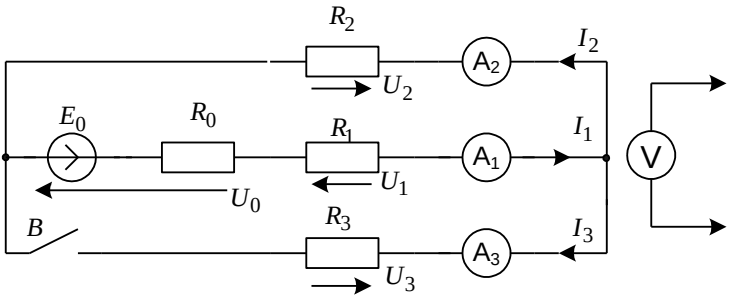


Рис. 38

3. Після перевірки викладачем правильності зібраної схеми увімкнути коло і заміряти напруги U_1, U_2, U_3, U_0, а також струми I_1, I_2, I_3 при розімкненому вимикачеві В. Результат вимірювань занести у звітну таблицю. Аналогічні вимірювання провести при замкненому вимикачеві В.

4. За результатами вимірювань обчислити суму струмів віток у вузлі, а також суму напруг у кожному за-

мкненому контурі. Результати обчислень записати у звітну таблицю.

Звітна таблиця

Режим кола	Виміряно							Обчислено			
	I_1	I_2	I_3	U_1	U_2	U_3	U_0	$I_1+I_2+I_3$	$U_1+U_2+U_0$	U_2+U_3	$U_0+U_1+U_3$
Розмірність	*A*	*A*	*A*	*B*	*B*	*B*	*B*	*A*	*B*	*B*	*B*
В розімкнений											
В замкнений											

Контрольні запитання

1. Що називається електричним колом?
2. Що називається гілкою, вузлом та контуром електричного кола?
3. Яка ознака активної ділянки електричного кола?
4. Що називається електричним струмом?
5. Дайте визначення електрорушійної сили та електричної напруги.
6. Що називається електричним опором і як його визначають?
7. Сформулюйте закон Ома для ділянки електричного кола.
8. Сформулюйте перший закон Кірхгофа.
9. Сформулюйте другий закон Кірхгофа.
10. Чому дорівнює потужність приймача електричної енергії?
11. Чому дорівнює потужність джерела електричної енергії?
12. Сформулюйте баланс потужності електричного кола.
13. Визначіть систему вимірювальних приладів та їх ціну поділок.

Лабораторна робота № 2

Дослідження кола змінного струму при послідовному сполученні резистора та конденсатора

Мета роботи: Експериментальне визначення параметрів електричного кола, що складається із резистора та конденсатора і побудова векторної діаграми.

Програма роботи.

1. Ознайомитись із робочою схемою. Перевірити наявність необхідних для виконання роботи елементів кола (джерела живлення, резистора, конденсаторів, а також вимірювальних приладів). Визначити ціну поділок вимірювальних приладів.

2. Скласти електричне коло за схемою на рис. 39.

3. Після перевірки викладачем правильності зібраного кола, увімкнути коло і виміряти струм I та напруги U_R на резисторі, U_C на конденсаторі та U на вході кола. Результати вимірювань записати у звітну таблицю 1.

4. Відповідно до схеми на рис. 40 паралельно до конденсатора C_1 під'єднати конденсатор C_2,, амперметри A_1 і A_2, та провести ті ж самі дії, що в пп. 1, 2, 3. Результати вимірювань записати у звітну таблицю 2.

5. За результатами вимірювань для обидвох випадків обчислити: активний опір резистора R, реактивний (ємнісний) опір конденсатора X_C та повний опір кола Z, ємність конденсаторів C_1 і C_2, активну P, реактивну Q та повну S потужності кола, а також коефіцієнт потужності cos φ і зсув фаз φ. Результати обчислень записати у звітні таблиці 1 та 2.

6. Побудувати векторні діаграми струмів та напруг.

Вихідна інформація для обчислень:

$$R = \frac{U_R}{I}; \quad X_C = \frac{U_C}{I}; \quad Z = \frac{U}{I}; \quad \omega = 2\pi f;$$

$$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C}; \quad P = U_R I = RI^2; \quad Q = U_{CI} I = X_C I^2;$$

$$S = UI = \sqrt{P^2 + Q^2}; \quad \cos\varphi = \frac{P}{S}; \quad \varphi = \arccos\varphi;$$

$$C_{12} = C_1 + C_2.$$

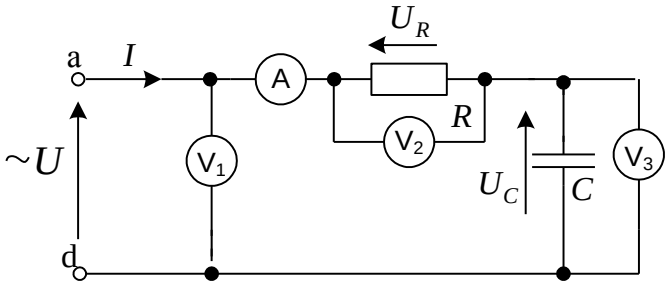


Рис. 39

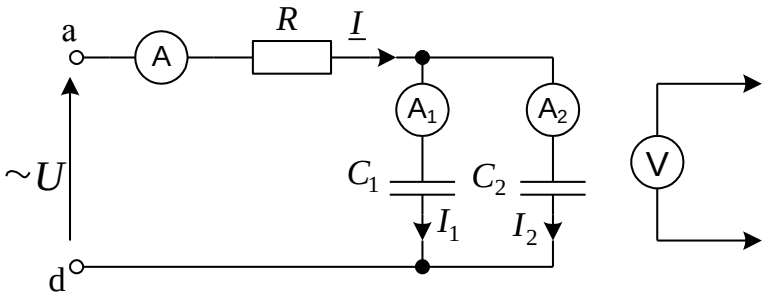


Рис. 40

Звітна таблиця 1

№ з/п	Виміряно				Обчислено								
	I	U_R	U_C	U	R	X_C	Z	C	P	Q	S	$\cos\varphi$	φ
	А	*В*	*В*	*В*	*Ом*	*Ом*	*Ом*	*мкФ*	*Вт*	*вар*	*ВА*		*град.*
1.													
2.													
3.													

Звітна таблиця 2

№ з/п	Виміряно							Обчислено										
	I	I_1	I_2	U_R	U_{C1}	U_{C2}	U	R	X_{C1}	X_{C2}	Z	C_1	C_2	P	Q_1	Q_2	S	$\cos\varphi$	φ
	А	*А*	*А*	*В*	*В*	*В*	*В*	*Ом*	*Ом*	*Ом*	*Ом*	*мкФ*	*мкФ*	*Вт*	*вар*	*вар*	*ВА*		*град.*
1.																			
2.																			

Контрольні запитання

1. Якими параметрами характеризується змінний синусоїдний струм?
2. Дайте визначення діючого значення змінного струму.
3. Дайте визначення середнього значення синусоїдного струму.
4. Які Ви знаєте способи сумування синусоїдних струмів?
5. Охарактеризуйте активний опір кола синусоїдного струму.
6. Охарактеризуйте ємнісний опір кола синусоїдного струму.
7. Дайте визначення активної потужності кола змінного струму.
8. Дайте визначення реактивної потужності кола змінного струму.
9. Сформулюйте визначення повної потужності кола синусоїдного струму.
10. Дайте визначення коефіцієнта потужності.
11. Що таке векторна діаграма струмів або напруг?

Лабораторна робота № 3

Дослідження кола змінного струму при послідовному сполученні резистора та котушки індуктивності

Мета роботи: Експериментальне визначення параметрів електричного кола, що складається із резистора і котушки індуктивності та побудова векторної діаграми.

Програма роботи.

1. Ознайомитись із робочою схемою, перевірити наявність необхідних для виконання роботи елементів (джерела живлення, резистора, котушки індуктивності) та вимірювальних приладів.

2. Скласти електричне коло, за схемою на рис. 41.

3. Після перевірки викладачем правильності зібраного кола, увімкнути коло і виміряти струм I та напруги U_R, U_L, U відповідно на резисторі, котушці та на вході кола. Результати вимірювань записати у звітну таблицю 1.

4. За схемою на рис. 42 послідовно до котушки L_1 під'єднати котушку L_2 і провести ті ж самі вимірювання, що і в п. 3. Результати вимірювань записати у звітну таблицю 2.

5. За результатами вимірювань для обидвох випадків обчислити: активний опір резистора R, індуктивності котушок L_1 та L_2, активну P, реактивну Q та повну S потужності кола, а також коефіцієнт потужності $\cos\varphi$ і зсув фази φ. Результати обчислень записати у звітні таблиці 1 та 2.

6. Побудувати векторні діаграми напруг та струму для обидвох випадків.

Звітна таблиця 1

Умови вимірювань	Виміряно				Обчислено								
	I	U_R	U_L	U	R	X_L	Z	L	P	Q	S	$\cos\varphi$	φ
	А	*В*	*В*	*В*	*Ом*	*Ом*	*Ом*	*Гн*	*Вт*	*вар*	*ВА*		*град.*
1. З осердям													
2. Без осердя													

Звітна таблиця 2

№ з/п	Виміряно							Обчислено										
	I	U_R	U_{L1}	U_{L1}	U_{L2}	U	R	X_{L1}	X_{L2}	Z	L_1	L_2	P	Q_1	Q_2	S	$\cos\varphi$	φ
	А	*В*	*В*	*В*	*В*	*В*	*Ом*	*Ом*	*Ом*	*Ом*	*Гн*	*Гн*	*Вт*	*вар*	*вар*	*ВА*		*град.*
1.																		
2.																		

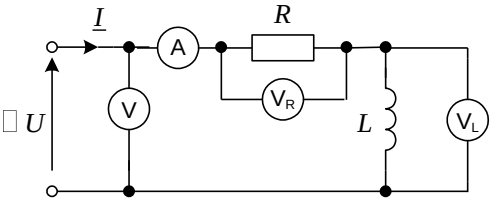


Рис.41

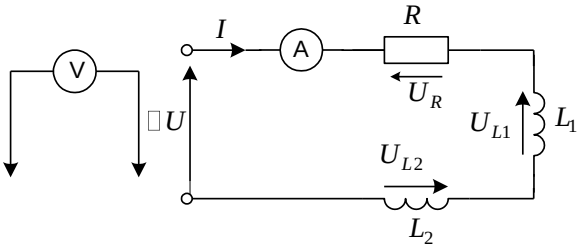


Рис. 42

Рекомендована інформація для обчислень:

$$R=\frac{U_h}{I};\quad X_L=\frac{U_L}{I};\quad Z=\frac{U}{I};\quad Z=\sqrt{R^2+X_L^2};\quad L=\frac{X_L}{2\pi f};$$

$$P=RI^2=U_RI;\quad Q=U_LI=X_LI^2;\quad S=UI;\quad S=\sqrt{P^2+Q^2};$$

$$\omega=2\pi f;\quad \cos\varphi=\frac{P}{S};\quad \varphi=\arccos\varphi;\ L_{1;2}=L_1+L_2.$$

Контрольні запитання

1. Які опори називаються реактивними? Охарактеризуйте індуктивний опір електричного кола синусоїдного струму.

2. Як індуктивний опір залежить від частоти, зокрема, яке його значення для постійного струму?

3. Які відмінності між індуктивним та ємнісним опорами?

4. Як сумуються активний та реактивний опори при послідовному з'єднанні?

5. Що таке трикутник напруг та трикутник опорів?

6. Який знак має кут зсуву фаз між напругою та струмом в колі при послідовному з'єднанні резистора та конденсатора?

Лабораторна робота № 4

Дослідження кола змінного струму при послідовному з'єднанні резистора, конденсатора та котушки індуктивності

Мета роботи: Експериментальне визначення параметрів електричного кола, що складається із резистора, конденсатора та котушки індуктивності і побудова векторних діаграм напруг, трикутників потужності та опорів.

Програма роботи.

1. Ознайомитись із робочою схемою, перевірити наявність необхідних для виконання роботи елементів кола (джерело живлення, конденсатора, резистора, котушки індуктивності) та вимірювальних приладів, визначити ціну поділок вимірювальних приладів.

2. Зібрати електричне коло за схемою на рис 43.

3. Після перевірки викладачем правильності зібраного кола, увімкнути коло. Записати у звітній таблиці показання амперметра. За допомогою полюсів n_1 та n_2 вимірювальних щупів визначити показання ватметра і вольтметра на затискачах резистора, котушки індуктивності, конденсатора та кола в цілому. Результати записати у звітну таблицю.

4. За результатами вимірювань обчислити: активний опір резистора R, реактивний індуктивний опір X_{L} котушки, реактивний ємнісний опір X_{C} конденсатора та повний опір кола Z, а також активну, реактивну і повну потужності кола та кут φ. Результати записати у звітну таблицю.

5. Побудувати векторну діаграму напруг і трикутники опорів та потужностей.

Вихідна інформація для обчислення.

$$R = \frac{U_R}{I}; \quad X_C = \frac{U_C}{I}; \quad X_L = \frac{U_L}{I}; \quad \cos\varphi = \frac{P}{UL};$$

$$P = RI^2 = UI\cos\varphi; \; Q = UI\sin\varphi = XI^2; \; S = UI = \sqrt{P^2+Q^2}.$$

Ціна поділки ватметра визначається наступним методом. Якщо зазначено, наприклад, що номінальні струм $I_H = 5\ A$ і напруга $U_H = 150\ B$ для даного ватметра, а шкала містить $n = 150$ поділок то цій шкалі відповідає потужність $P_H = U_H I_H = 150 \cdot 5 = 750\ Вт$.

Зрозуміло, що $C_a = \dfrac{750}{150} = 5\ Вт/под$.

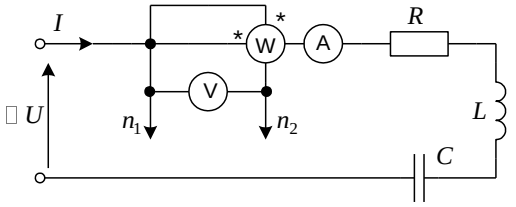


Рис. 43

Звітна таблиця

	Елем./ Велич.	Розмір-ність	Резис-тор	Котуш-ка	Конден-сатор	Усе коло
Виміряно	*U*	*В*				
	I	*А*				
	P	*Вт*				
Обчислено	*R*	*Ом*				
	X_L	*Ом*				
	X_C	*Ом*				
	Z	*Ом*				
	Q	*вар*				
	S	*ВА*				
	cos φ					
	φ	*град.*				

Контрольні запитання

1. Чому дорівнює повний опір кола, що складається із послідовного сполучення резистора, .котушки та конденсатора?
2. Який може мати знак кут зсуву фаз між струмом та підведеною напругою до кола, що складається із послідовно з'єднаних резистора, конденсатора та котушки індуктивності?
3. Що таке резонанс напруг?
4. Чи може напруга на реактивному елементі перевищувати підведену? Аргументуйте запропоновану відповідь.
5. Нарисуйте векторну діаграму напруг для кола, в якому індуктивний опір перевищує ємнісний.
6. Як вимірюється активна потужність?

Лабораторна робота № 5

Дослідження кола змінного струму при паралельному з'єднанні резистора, конденсатора та котушки індуктивності

Мета роботи: Експериментальне визначення параметрів електричного кола, що складається із резистора, конденсатора та котушки індуктивності і побудова векторних діаграм провідностей і струмів, а також трикутників потужності та опорів.

Програма роботи.

1. Ознайомитись із робочою схемою, перевірити наявність необхідних для виконання роботи елементів кола (джерело живлення, конденсатора, резистора, котушки індуктивності) та вимірювальних приладів, визначити ціну поділок вимірювальних приладів.

2. Скласти електричне коло за схемою на рис. 44.

3. Провести експерименти для наступних режимів: паралельне з'єднання елементів R та L (ключі K_1 та K_2 замкнені, а ключ K_3 розімкнений); паралельне з'єднання елементів L та C (K_2 та K_3 – замкнені, а ключ K_1 – розімкнений); паралельне з'єднання елементів R, L, C – усі ключі замкнені. Показання усіх приладів для кожного режиму занести у звітну таблицю.

4. За результатами вимірювань обчислити: для кожного режиму як повну провідність, так і її активну та реактивні складові, коефіцієнт потужності $\cos\varphi$, кут φ, реактивну та повну потужності. Результати записати у звітну таблицю.

5. Побудувати векторні діаграми струмів та провідностей, а також трикутники потужностей та опорів.

Звітна таблиця

Тип кола	Виміряно						Обчислено						
	I_1	I_2	I_3	I_4	P	U	Y	G	B	$\cos\varphi$	Q	S	φ
	А	*А*	*А*	*А*	*Вт*	*В*	*Ом*$^{-1}$	*Ом*$^{-1}$	*Ом*$^{-1}$		*вар*	*ВА*	*град.*
RL													
RC													
LC													
RLC													

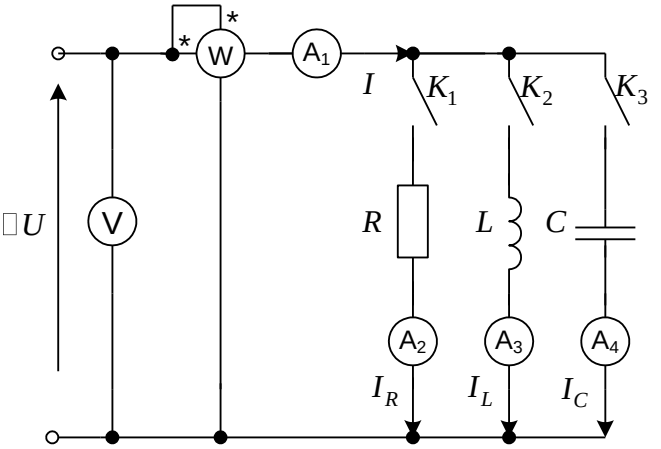


Рис. 44

Вихідна інформація для обчислень:

$$Y = \frac{I}{U}; \quad G = Y\cos\varphi; \quad B = Y\sin\varphi; \quad Y = \sqrt{G^2 + B^2}$$

$$P = UI\cos\varphi; \qquad Q = UI\sin\varphi; \qquad S = UI;$$

$$\cos\varphi = \frac{P}{UI}; \qquad B = B_L + (-B_C).$$

Контрольні запитання

1. Чому дорівнює активна, ємнісна та індуктивна провідності?
2. Чому дорівнює повна провідність електричного кола?
3. У якому випадку повна провідність електричного кола може дорівнювати активній провідності?
4. Дайте визначення трикутника струмів.
5. Що таке трикутник провідностей?
6. Охарактеризуйте резонанс струмів.
7. Як в електричному колі можна покращити коефіцієнт потужності?
8. Як змінюється повна провідність кола, що складається із паралельно з'єднаних резистора, конденсатора та котушки індуктивності при зміні частоти від нуля до безмежності?

Лабораторна робота № 6

З'єднання зіркою трифазного електричного кола

Мета роботи: Ознайомитись експериментально із властивостями з'єднаних зіркою резисторних споживачів електричної енергії у трифазному колі у різних режимах, а саме:

1) рівномірне (симетричне) навантаження фаз без нульового проводу;
2) рівномірне навантаження з нульовим проводом;
3) нерівномірне навантаження без нульового проводу;
4) нерівномірне навантаження з нульовим проводом;
5) обрив фази при відсутності та при наявності нульового проводу.

Основні теоретичні положення.

Трифазними колами називаються кола, в яких діють трифазні джерела (генератори) електричної енергії. Трифазні джерела в неаварійних режимах завжди симетричні, тобто такі, в яких усі три електрорушійні сили рівні за амплітудою та зсунуті в часі між собою на однаковий кут, а саме 120° або $2\pi/3$ радіан. Несиметричний режим у трифазному колі створюється, як правило, за рахунок нерівномірного навантаження.

Програма роботи.

1.Ознайомитись із лабораторним стендом, його комплектацією.

2.При участі викладача зібрати схему показану на рис. 45 і перевірити роботу кола під напругою.

3.Встановити рівномірне навантаження (ключі В1 та В2 замкнені) і заміряти усі струми та напруги при наявності нульового проводу (ключ В3 замкнений) та при відсутності нульового проводу (ключ В3 розімкнено). Дані вимірів занести у звітну таблицю (режим А).

4.Встановити нерівномірне навантаження (ключ В1 та В2 розімкнено, тобто у фазі Аі, увімкнена тільки Л3, а у фазі В увімкнені Л5 та Л6 і у фазі С увімкнені Л7, Л8, Л9) Заміряти усі струми та напруги при наявності та відсутності нульового проводу, за аналогією з п. 2.3. Дані вимірів занести у звітну таблицю (режим Б)

5.Здійснити обрив однієї із фаз (за вказівкою викладача), шляхом від'єднання її лінійного проводу і провести заміри за аналогією з п. 2.3. Дані вимірів занести у звітну таблицю (режим В).

6.За результатами вимірювань провести всі обчислення, передбачені у звітній таблиці.

7.Побудувати векторні діаграми струмів та напруг для усіх випадків.

8.Із векторних діаграм визначити струм нейтрального проводу I_N та напругу на ключі В3, U_N. Для усіх випадків записати отримані значення у звітну таблицю і порівняти їх із значеннями отриманими експериментально.

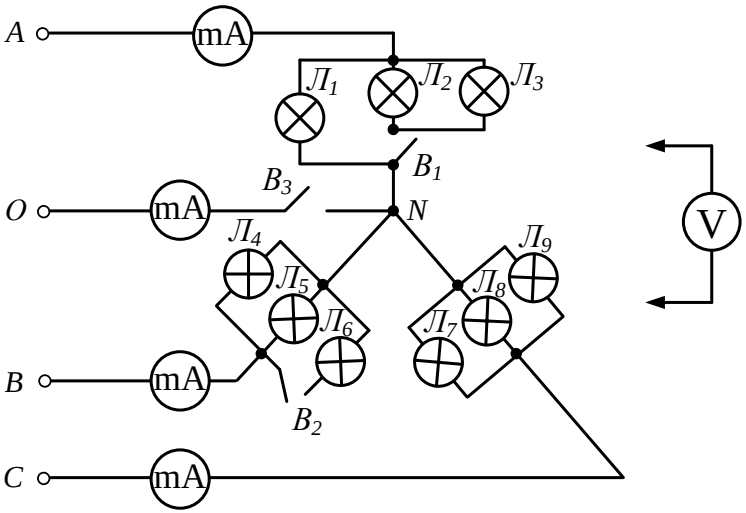


Рис. 45

Звітна таблиця.

Режими роботи		Вимірювання										
		U_{AO}	U_{BO}	U_{CO}	U_{AB}	U_{BC}	U_{CA}	U_{ON}	I_A	I_B	I_C	I_N
		В	*В*	*В*	*В*	*В*	*В*	*В*	*А*	*А*	*А*	*А*
З нульовим проводом	А											
	Б											
	В											
Без нульового проводу	А											
	Б											
	В											

Режими роботи		Обчислено								
		З досліду							З вектор. діаграм	
		R_A	R_B	R_C	P_A	P_B	P_C	ΣP	U_{ON}	I_N
		Ом	*Ом*	*Ом*	*Вт*	*Вт*	*Вт*	*Вт*	*В*	*А*
З нульовим проводом	А									
	Б									
	В									
Без нульового проводу	А									
	Б									
	В									

Контрольні запитання

1. Як утворюється з’єднання споживачів зіркою?
2. У якому випадку немає струму у нульовому проводі і чому?
3. Яке співвідношення між фазними та лінійними напругами при несиметричному навантаженні, при відсутності та при наявності нульового проводу?
4. Режим обриву фази і його особливості при з’єднанні споживачів зіркою з нульовим проводом і без нього.
5. Яке співвідношення між фазними та лінійними струмами та напругами при з’єднанні зіркою при симетричному навантаженні?
6. Яке призначення нульового проводу?

Лабораторна робота № 7

З'єднання трикутником трифазного електричного кола

Мета роботи. На досліді ознайомитись із властивостями з'єднаних трикутником резисторних споживачів електричної енергії у трифазному колі у різних режимах роботи, а саме при:

1) рівномірному (симетричному) навантаженні фаз;
2) нерівномірному (несиметричному) навантаженні фаз;
3) режимі обриву фази при симетричних споживачах;
4) режимі обриву лінії при симетричних споживачах.

Програма роботи.

1.Ознайомитись із лабораторним стендом, його комплектацією.

2.При участі викладача зібрати схему, показану на рис. 46 і перевірити роботу кола під напругою.

3.Встановити рівномірне навантаження (ключі В1,В2 замкненні) і заміряти усі струми та напруги. Дані вимірів занести у звітну таблицю (режим А).

4.Встановити нерівномірне навантаження (ключі В1, В2 розімкнені, лампи Л2, Л3 та Л6 від'єднані) і заміряти усі струми та напруги. Дані вимірів занести у звітну таблицю (режим Б).

5.Розімкнути ключ В1 та викрутити лампу Л1, а ключ В2 замкнути. У цьому випадку фаза A_1B_1 вимкнена, а фази B_1C_1 та C_1A_1 мають однакові навантаження. Покази приладів занести у звітну таблицю (режим В).

6.За результатами вимірювань здійснити усі обчислення передбачені у звітній таблиці.

7.Для усіх режимів побудувати векторні діаграми струмів та напруг.

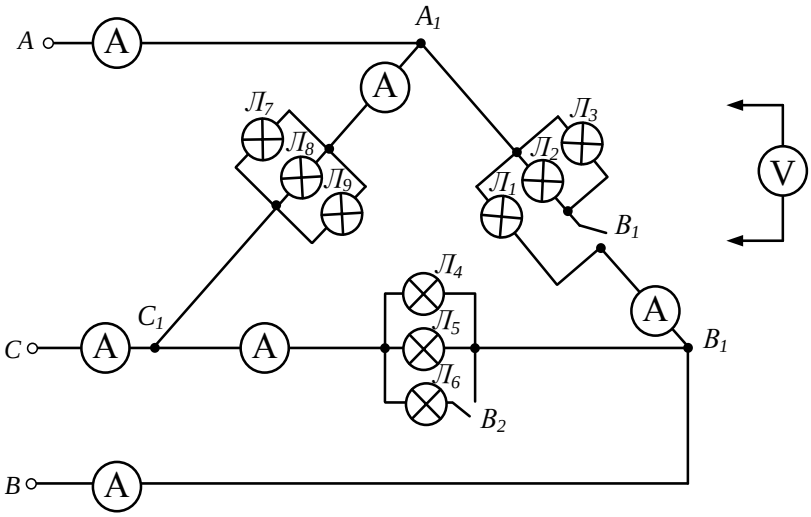


Рис. 46

Звітна таблиця.

Режим роботи	Виміряно								
	I_A	I_B	I_C	I_{A1B1}	I_{B1C1}	I_{C1A1}	U_{AB}	U_{BC}	U_{CA}
	A	*A*	*A*	*A*	*A*	*A*	*B*	*B*	*B*
А									
Б									
В									

Режим роботи	Обчислено						
	R_{AB}	R_{BC}	R_{CA}	P_{AB}	P_{BC}	P_{CA}	$\Sigma P_Ф$
	Ом	*Ом*	*Ом*	*Вт*	*Вт*	*Вт*	*Вт*
А							
Б							
В							

Контрольні запитання

1. Як утворюється з’єднання споживачів трикутником?
2. Яке співвідношення між фазними та лінійними струмами при симетричному навантаженні?
3. Як змінюються фазні напруги при несиметричному навантаженні окремих фаз?
4. Як змінюються усі струми при обриві однієї фази?
5. Як змінюються струми та напруги при обриві лінійного проводу ?

Лабораторна робота № 8

Ознайомлення з будовою та дослідження основних характеристик силового трансформатора

Мета роботи.

1. Вивчити будову та принцип дії трансформатора.
2. Зняти вольт-амперну характеристику трансформатора в неробочому режимі та визначити коефіцієнт трансформації.
3. Зняти зовнішню характеристику трансформатора в режимі змінного резисторного навантаження та обчислити зміну коефіцієнта трансформації.

Основні теоретичні положення.

Трансформатор складається із магнітопровода, на якому розташовані дві обмотки: одна із більшою кількістю витків w_1 – обмотка високої напруги (для понижувального трансформатора), друга із меншою кількістю витків w_2 – обмотка низької напруги (рис. 47). Магнітопровід представляє собою замкнене феромагнітне осердя, виготовлене із листів електротехнічної сталі. При розімкненій вторинній обмотці (неробочий режим $I_2 = 0$). Струм первинної обмотки I_1 утворює магнітний потік Φ_1, який індукує у первинній та вторинній обмотках електрорушійні сили, діючі значення, яких дорівнюють:

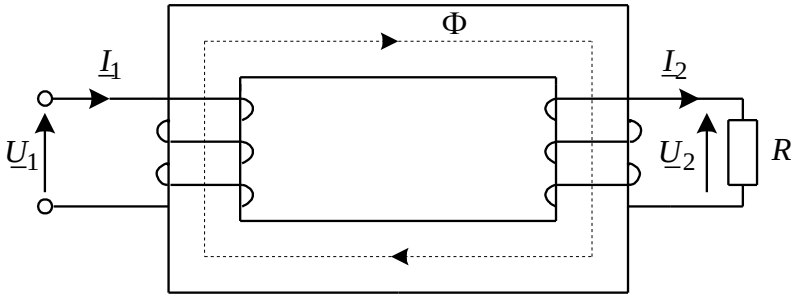


Рис. 47

$$E_1 = 4{,}44\, w_1 f \Phi_m; \qquad E_2 = 4{,}44\, w_2 f \Phi_m.$$

Відношення E_2 до E_1 називається коефіцієнтом трансформації і визначається за формулою:

$$k = \frac{E_2}{E_1} = \frac{W_2}{W_1} = \frac{U_{20}}{U_{10}},$$

де U_{10}, U_{20} – відповідно напруги на первинній та вторинній обмотках при неробочому режимі ($I_2 = 0$).

Дослід неробочого режиму проводиться при номінальній напрузі і дозволяє визначити коефіцієнт трансформації за приведеною вище формулою. Зняття вольт-амперної характеристики в неробочому режимі виявляє залежність вхідного струму від підведеної напруги.

При під'єднанні навантаження R вторинною обмоткою протікатиме струм I_2, який за принципом Ленца буде зменшувати потік Φ, а значить і ЕРС E_1, що в свою чергу викличе зростання струму I_1, оскільки E_1 повинна зрівноважувати підведену напругу U_{10}. Таким чином струм I_1 залежить від величини опору R, при $R = \infty$ (неробочий режим) струм $I_2 = 0$, а струм I_{10}, буде мінімальним (в ідеальному трансформаторі $I_{10} = 0$). При номінальному навантаженні $R = R_H$, обмотками трансформатора протікають номінальні струми.

Оскільки в реальному трансформаторі мають місце падіння напруг на обвитках, то при незмінній підведеній напрузі, з ростом навантаження (струм I_2) напруга U_2 буде зменшуватись. Ця залежність дістала назву зовнішньої характеристики трансформатора , а саме:

$$U_2 = f(I_2), \text{ при } U_1 = const.$$

Програма роботи.

1. На розібраному трансформаторі ознайомитись з його конструкцією та призначенням окремих вузлів.

2. За участю викладача зібрати схему показану на рис. 48.

3. Записати номінальні параметри трансформатора S_H, U_{1H}, U_{2H}, та визначити ціну поділок приладів.

4. Встановлюючи автотрансформатором ЛАТР на вході досліджуваного трансформатора T_2 наступні значення напруг: $0{,}2U_{1H}$, $0{,}6U_{1H}$, $0{,}8U_{1H}$, U_{1H}, зняти характеристику неробочого режиму, покази усіх приладів записати у звітну таблицю.

5. Встановити автотрансформатором ЛАТР на вході T_2 напругу $U_1 = U_{1H}$, за допомогою зміни опору резистора R_1 встановити такі значення R, щоб по вторинній обмотці протікали струми з наступними значеннями $0{,}4I_{2H}$, $0{,}8I_{2H}$, I_{2H}, $1{,}2I_{2H}$. Покази приладів записати у звітну таблицю.

6. На підставі вище наведених формул здійснити обчислення усіх величин передбачених у звітній таблиці та побудувати характеристику неробочого режиму і зовнішню характеристику трансформатора.

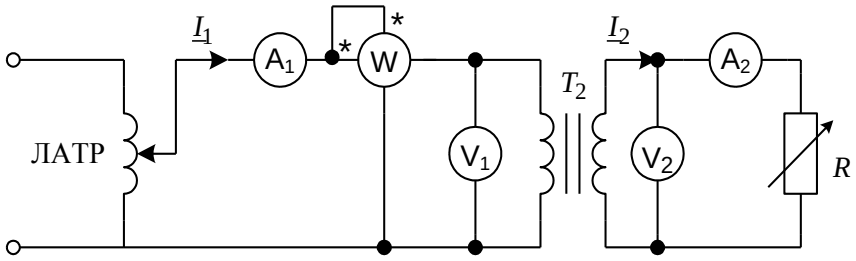


Рис. 48

Звітна таблиця.

Режим	Виміряно					Обчислено		
	U_1	I_1	P_1	U_2	I_2	k	*к.к.д*	P_2
	В	*А*	*Вт*	*В*	*А*			*Вт*
Неробочий режим					0		–	0
					0		–	0
					0		–	0
					0		–	0
					0		–	0
Режим змінного навантаження								

Контрольні запитання

1. Поясніть призначення та принцип дії трансформатора.
2. Що таке коефіцієнт трансформації?
3. Від чого залежить коефіцієнт трансформації?
4. Які втрати потужності мають місце в трансформаторі?
5. Чому трансформатор не може працювати в колі постійного струму?

Лабораторна робота № 9

Ознайомлення з будовою та основними характеристиками асинхронного двигуна з фазним ротором

Мета роботи.

1. Ознайомитись з конструкцією та принципом дії асинхронного двигуна з фазним ротором.
2. Засвоїти правила пуску, зупинки та реверса двигуна.
3. Виявити вплив обриву фази статора двигуна (перед пуском та під час роботи) на його роботу.
4. Ознайомитись із робочими характеристиками двигуна.

Основні теоретичні положення.

Асинхронний двигун (АД) трифазного струму є електричною машиною, яка призначена для перетворення електричної енергії трифазного струму в механічну енергію. Двигун складається з двох основних частин: нерухомої – статора і обертової – ротора. Статор складається з корпусу, виготовленого з чавуну. В корпус вмонтоване циліндричне осердя, виготовлене з електротехнічної листової сталі, на внутрішній частині циліндра в пазах розташована трифазна обмотка. Ця обмотка під'єднується в трифазну електричну мережу. В залежності від номінальної фазної напруги обмоток статора і лінійної напруги мережі обмотки статора з'єднують "зіркою" або "трикутником". Обмотки бувають двох типів: короткозамкнена і фазна. Відповідно до цього АД поділяються на два основні типи: АД з короткозамкненим ротором і АД з фазним ротором (АД з контактними кільцями).

В даній лабораторній роботі розглядається АД з фазним ротором. Ротор такого двигуна виготовлений з листової електротехнічної сталі. В пазах ротора розташована трифазна обмотка. Одні кінці цієї обмотки з'єднані зіркою, а другі під'єднуються до трьох ізольованих одне від одного контактних кілець. За допомогою цих контактних кілець

і щіток в коло ротора під'єднується пусковий реостат (для збільшення пускового моменту і одночасно зменшення пускового струму). Реостатом в колі ротора двигуна можна ще змінювати швидкість обертання ротора.

Принцип роботи АД. При увімкнені трифазної обмотки статора протікає трифазний струм . Цей струм утворює обертове магнітне поле, яке обертається з частотою

$$n_1 = \frac{60\,f}{p},$$

де n_1 – число обертів поля, f – частота напруги мережі, p – число пар полюсів .

Обертове магнітне поле перетинає обмотку ротора і наводить в ній (на основі закону електромагнітної індукції) змінну ЕРС з частотою f_2. Ця ЕРС в замкнутій обмотці ротора викличе струм I_2. В результаті взаємодії струму ротора і обертового магнітного поля виникає сила, що утворює обертовий момент і ротор буде обертатися в цьому напрямі, що і обертове магнітне поле, проте з дещо меншою частотою обертання

$$n_2 = n_1\,(1 - S),$$

де n_2 – частота обертання ротора, S – ковзання двигуна.

Пуск АД з фазним ротором. Якщо під'єднати статор АД безпосередньо до трифазної мережі, то пускові струми статора і ротора будуть перевищувати номінальні струми в 4 – 7 разів, а пусковий момент буде становити (0,7 – 1,1) номінального моменту. Для зменшення пускового струму і збільшення пускового моменту в коло ротора двигуна на час пуску під'єднують пусковий реостат у вигляді трьох резистивних опор, з'єднаних зіркою і під'єнаних за допомогою щіток до кілець ротора двигуна.

Порядок пуску.

1. Пусковий реостат ставиться на максимальний опір (переконавшись при цьому, що щітки лежать на кільцях ротора).

2. Під'єднується двигун до мережі і ротор двигуна починає обертатись.
3. В міру зменшення пускового струму і розгону двигуна поступово виводиться пусковий реостат (зменшуючи його опір) і в кінці пуску реостат повинен бути повністю виведений.

Зупинка АД. Щоб зупинити двигун, необхідно:

1. Від'єднати двигун від мережі.
2. Поставити пусковий реостат на максимальний опір .
3. Опустити щітки на кільця, проводячи одночасно розмикання кілець (при наявності в машині пристосування для підняття щіток).

Виконуючі дві останні операції, тим самим підготовляється схема двигуна для наступного пуску.

Реверс АД. Щоб змінити напрям обертання ротора, необхідно змінити напрямок обертання магнітного поля. Це досягається зміною місцями будь-яких клем двох лінійних проводі або клем обмотки статора.

Регулювання частоти обертання АД. Регулювання частоти обертання асинхронного двигуна з фазним ротором можна проводити такими способами:

1. Реостатом в колі ротора. В коло ротора двигуна вводиться регулювальний реостат, змінюючи його опір, що змінює частоту обертання двигуна.

2. Зміною числа пар полюсів (p). Частота обертання поля статора дорівнює $n_1 = \frac{60 f}{p}$, тому, змінюючи число пар полюсів обмотки статора p змінюємо частоту обертання обертового поля двигуна, а внаслідок цього і частоту обертання ротора

$$n_2 = \frac{60 f}{p}(1 - S).$$

Число пар полюсів може бути тільки цілим числом, тому зміна частоти обертання поля, а внаслідок цього і частота обертання ротора будуть ступінчастими.

3. Зміною частоти (*f*).

Розрахункові формули

Ковзання визначається за формулою $S = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$.

Коефіцієнт потужності обчислюється за формулою

$$cos\varphi = \frac{P_1}{U_1 I_1},$$

де U_1, I_1 - лінійні напруга і струм статора; P_1 – споживана двигуном потужність.

Момент на валу двигуна обчислюється за формулою

$$M = 9,55 \frac{P_2}{n_2} \text{ Н} \cdot \text{м},$$

де P_2 – потужність на валу двигуна.

Програма роботи.

1. На розібраному двигуні ознайомитись з його конструкцією, призначенням його окремих вузлів.
2. Ознайомитись із лабораторною установкою, її вимірювальними приладами.
3. За безпосередньої участі викладача здійснити пуск, режим навантаження, зупинку та реверс двигуна, а також обрив фази статора.
4. Для кожного із здійснених режимів записати показання приладів у звітну таблицю.
5. На підставі вищенаведених розрахункових формул здійснити обчислення усіх величин передбачених у звітну таблицю.
6. Зробити висновки щодо виявлення особливостей для кожного із здійснених режимів.

Звітна таблиця.

№ з/п	Виміряно							Обчислення				
	U	*I*	P_{W1}	P_{W2}	n_2	*Iг*	*Uг*	*Рд*	*Рг*	*ккд*	*S*	*cosφ*
	В	*А*	*Вт*	*Вт*	*об/хв*	*В*	*В*	*Вт*	*Вт*	*%*	*%*	
1												
2												
3												
4												
5												

Контрольні запитання

1. Пояснити умови утворення обертового магнітного поля.
2. Нарисувати перетин асинхронного двигуна та пояснити принцип його роботи.
3. Нарисувати схему асинхронного двигуна з фазним ротором і пояснити його пуск, зупинку, реверс.
4. Як буде вести себе асинхронний трифазний двигун при обриві фази під час його роботи?
5. Як буде вести себе асинхронний трифазний двигун, якщо перед пуском відбудеться обрив фази?

Лабораторна робота № 10

Ознайомлення з будовою та з основними характеристиками генератора постійного струму

Мета роботи.

1. Вивчити будову та принцип дії шунтового генератора постійного струму.
2. Зняти основні характеристики генератора.

Основні теоретичні положення.

Будова генераторів постійного струму.

Нерухома частина машини називається статором, складається із масивного стального корпусу, до якого прикріплені головні і додаткові полюси. На головних полюсах розташовані котушки однієї або декількох обмоток збудження, на додаткових полюсах-обмотки додаткових полюсів.

В підшипниках на валу находиться рухома частина машини якір. В пазах якоря розміщена обмотка якоря, виводи секцій якої приєднуються до колектора. Колектор являє собою циліндр з мідних ізольованих одна від одної і від вала пластин. До колектора, за допомогою пружин, притискуються вугільно-графітові щітки. Обмотки збудження машини живляться постійним струмом і призначені для утворення основного магнітного поля. Обмотки додаткових полюсів включаються послідовно з обмоткою якоря. Додаткові полюси служать для зменшення дії реакції якоря – для зменшення іскріння між щітками і колектором.

Принцип дії генератора.

Якір генератора приводиться в обертання від первинного двигуна (парової, водяної або газової турбін, двигуна внутрішнього тощо). При обертанні якоря в постійному магнітному полі (полі головних полюсів) секції обмотки якоря буде пронизувати магнітний потік, і за зако-

ном електромагнітної індукції в провідниках якоря буде наводитися змінна ЕРС. Ця ЕРС подається на колектор, а з колектора знімається щітками вже постійна ЕРС. Таким чином, колектор в генераторі постійного струму працює випрямлячем – перетворює змінну ЕРС в постійну. Величина ЕРС, яка наводиться в якорі, може бути визначена за формулою:

$$E = C_e n \Phi,$$

де C_e – стала величина, що залежить від конструктивних параметрів машини; n – число обертів якоря; Φ – магнітний потік.

Напруга на клемах генератора менша від ЕРС на величину падіння напруги в якорі:

$$U = E - I_Я \cdot R_Я.$$

Таким чином генератор постійного струму перетворює механічну енергію (енергію первинного двигуна) в електричну енергію постійного струму.

Основні властивості генератора постійного струму залежать від способу збудження генератора. В залежності від способу збудження розрізняють:

– генератори незалежного збудження;

– генератори паралельного збудження (шунтові);

– генератори послідовного збудження (серієсні);

– генератори змішаного збудження (компаундні).

Коло обмотки збудження генератора паралельного збудження включають паралельно до якоря. Розглянемо основні характеристики шунтового генератора постійного струму.

Характеристика неробочого режиму $E = f(I_{зб})$ представляє собою залежність ЕРС. від струму збудження при роботі генератора в режимі неробочого ходу при постійній частоті обертання і при відсутності навантаження.

Зовнішня характеристика $U = f\ (I_Г)$, представляє собою залежність напруги на клемах генератора від струму навантаження $I_Г$ при $n = const$ і $R_{зб} = const$. ($R_{зб}$ – опір регу-

лювального реостата в колі обмотки збудження). Формулу зовнішньої характеристики отримують із врахуванням того, що: $I_Г = I_Я - I_{зб}$. Проте струмом збудження можна нехтувати внаслідок його відносно малої величини. Таким чином, $U = C_e n \Phi - R_Я I_Г$.

При збільшенні струму навантаження I напруга на клемах генератора буде зменшуватись за рахунок падіння напруги в якорі $I_Я \cdot R_Я$. Крім цього, напруга буде зменшуватися за рахунок пониження ЕРС. під час навантаження генератора. ЕРС E буде також зменшуватися за рахунок часткового зменшення струму збудження і за рахунок реакції якоря.

Значний спад напруги на клемах шунтового генератора є його основним недоліком. Для уникнення цього явища на головні полюси машини поміщають ще одну обмотку збудження (серієсну обмотку). Ця обмотка вмикається послідовно з обмоткою якоря і узгоджено з шунтовою обмоткою. Такий генератор називається генератором змішаного збудження. При навантаженні такого генератора магнітне поле його посилюється за рахунок послідовної (серієсної) обмотки збудження, збільшується ЕРС і напруга на клемах генератора залишається незмінною. Напруга на клемах такого генератора практично не залежить від навантаження. Регулювальна характеристика $I_{зб} = f(I_Г)$, являє собою залежність струму збудження від струму навантаження при постійних номінальних обертах і номінальній напрузі на клемах генератор. Ця характеристика показує, як необхідно змінювати струм збудження при збільшенні струму навантаження, щоб при постійних номінальних обертах підтримати напругу на клемах генератора номінально.

При знятті регулювальної характеристики треба встановити на клемах генератора номінальну напругу. Першу точку слід зняти при відсутності навантаження ($I = 0$), а далі збільшувати струм навантаження на 10 % від номі-

нального і підтримувати напругу номінальною, змінюючи струм збудження. Машину навантажити до номінального струму.

Програма роботи.

1. На розібраному генераторі ознайомитись з його конструкцією та функціональним призначенням його окремих вузлів.

2. Ознайомитись із будовою універсального лабораторного стенду та його вимірювальними приладами.

3. При безпосередній участі викладача здійснити запуск генератора та зняти характеристику неробочого ходу генератора $U_Г = E = f(I_{зб})$ при $I_Г = 0$, $n = const$.
Результати експерименту записати у звітну таблицю 1.

Звітна таблиця 1.

№ з/п		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Зауваження
$I_{зб}$ (а)	*A*											При збільшенні $I_{зб}$
U_0 (в)	*B*											
← $I_{зб}$(а)												При зменшенні $I_{зб}$
← U_0(в)												

4. Зняти зовнішню характеристику $U = f(I)$ при $R_{зб} = const$, $n = const$. Результати досліду записати в звітну таблицю 2.

Звітна таблиця 2.

№ з/п		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Струм *I* генератора	*A*	0									
Напруга на клемах генератора *U*	*B*										

5. Зняти регулювальну характеристику. $I_{зб} = f(I)$ при $n = const$, $U = U_H = const$, результати досліду записати в звітну таблицю 3.

Звітна таблиця 3.

№ з/п		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
I	A	0									
$I_{зб}$	A										

Контрольні запитання

1. Поясніть суть закону електромагнітної індукції.
2. Нарисуйте будову електричної машини постійного струму і поясніть принцип її роботи як генератора.
3. Для чого служать обмотки збудження і як вони під'єднуються по відношенню до якоря?
4. Для чого служать додаткові полюси?
5. Конструкція і призначення колектора.
6. Від чого залежить ЕРС і напруга генератора?
7. Призначення шунтового реостата.

Лабораторна робота № 11

Ознайомлення з будовою та з основними характеристиками шунтового двигуна постійного струму

Мета роботи.

1. Вивчити будову шунтового двигуна постійного струму.
2. Виміряти його основні характеристики.
3. Засвоїти правила пуску, зупинки та регулювання частоти обертання двигуна постійного струму.

Основні теоретичні положення.

Будова генераторів та двигунів постійного струму однакова.

Пуск двигуна. Для шунтового двигуна постійного струму основні співвідношення між величинами, що характеризують роботу двигуна, виражаються наступними формулами:

$$E = C_e n \Phi,$$

де E – протиелектрорушійна сила; C_e – постійний для даного двигуна коефіцієнт; Φ – магнітний потік полюсу двигуна; n – кількість обертів двигуна за хвилину;

$$U = E + R_Я I_Я,$$

а з врахуванням попередньої формули

$$Iя = \frac{U - C_e n \Phi}{R_Я},$$

де $I_Я$ – струм якоря; U – напруга на затискачах якоря; $R_Я$ – внутрішній опір кола якоря;

$$M = C_M \Phi I_Я,$$

де M – електромагнітний момент двигуна; C_M – постійний для даного двигуна коефіцієнт.

В момент пуску, коли $n = 0$, відповідно до попередніх виразів виникає пусковий струм якоря $I_{ЯП} = \frac{U}{R_Я}$, який перевищує у багато разів номінальний струм якоря $I_{ЯН}$ і

може привести до пошкодження обмотки якоря, колектора та кіл живлення двигуна. Тому для обмеження пускового струму необхідно при пуску вмикати пусковий реостат на максимальне значення опору.

Зупинка двигуна. Для зупинки двигуна слід вимкнути живлення двигуна, потім встановити пусковий реостат на максимальне, а реостат $R_{Ш}$ – на мінімальне значення опору, готуючи двигун до наступного пуску.

Реверс двигуна. Для здійснення реверсу слід змінити напрям струму або в обмотці збудження, або в обмотці якоря. Для цього слід зупинити двигун, виконати відповідні зміни у схемі, а потім знову ввімкнути двигун за наведеними вище правилами пуску.

Зняття основних характеристик. В роботі пропонується зняти три основні характеристики шунтового двигуна.

1. **Швидкісна характеристика двигуна** в режимі неробочого ходу відображається залежністю:

$$n = f(I_{зб}) \quad \text{при} \quad U = U_H = const, \; I = 0 \; .$$

Характер цієї залежність можна встановити на основі формули

$$n = \frac{U - RяIя}{CeФ} \; .$$

При зростанні струму збудження шунтової обмотки зростає магнітний потік $Ф$ і з останньої формули видно, що зменшується частота обертання двигуна. Якщо в процесі роботи двигуна $I_{зб}$ стане рівним нулю, тобто коло збудження розірветься, то магнітний потік $Ф$ стане дуже малим, і швидкість обертання двигуна почне різко зростати. Це може привести до поломки та зрушення двигуна з фундаменту. Таке явище називається розносом двигуна. Тому слід дуже уважно збирати коло обмотки збудження та слідкувати, щоб випадково в процесі роботи не стався обрив кола обмотки збудження, а у випадку такого обриву терміново вимкнути живлення двигуна.

2. **Зовнішня характеристика двигуна**. Цю характеристику відображає залежність: $n = f(I_Я)$ при $U = U_H = const$, $I_{зб} = const$.

3. Регулювальна характеристика двигуна. Цю характеристику відображає залежність: $I_{зб} = f(I_Я)$ при $U = U_H = const$, $n = const$.

Програма роботи.

1. На розібраному двигуні ознайомитись з його конструкцією та функціональним призначенням окремих вузлів.

2. При безпосередній участі викладача здійснити пуск, зупинку та реверс двигуна та зняти швидкісну характеристику двигуна в режимі неробочого ходу $n = f(I_{зб})$ при $U = U_H = const$, $M = 0$. Результати вимірювань записати у звітну таблицю 1.

Звітна таблиця 1.

№ з/п		1	2	3	4	5	6	7	8
$I_{зб}$	*А*								
n	*об/хв*								

3. Зняти зовнішню характеристику двигуна $n = f(I_Я)$ при $U = U_H = const$, $I_{зб} = const$. Результати вимірювань записати у звітну таблицю 2.

Звітна таблиця 2.

№ з/п		1	2	3	4	5	6	7	8
$I_Я$	*А*								
n	*об/хв*								

4. Зняти регулювальну характеристику двигуна $I_{зб} = f(I_Я)$ при $U = U_H = const$, $n = n_H = const$. Результати вимірювань записати в звітну таблицю 3.

Звітна таблиця 3.

№ з/п		1	2	3	4	5	6	7	8
$I_Я$	*A*								
$I_{зб}$	*A*								

Контрольні запитання

1. Нарисувати переріз електричної машини постійного струму і пояснити принцип її роботи в режимі двигуна.
2. Як класифікуються двигуни постійного струму за способом включення обмотки збудження?
3. Які правила пуску, зупинки та реверсу шунтового електричного двигуна постійного струму?
4. Що таке рознос двигуна постійного струму?
5. Як знімаються основні характеристики електричного двигуна постійного струму?
6. Пояснити зміст основних характеристик електричного двигуна постійного струму.

Розділ 3. Основи електробезпеки та правила техніки безпеки

3.1. Основи електробезпеки

3.1.1. Дія електричного струму на організм людини

Статистика електротравматизму свідчить, що смертельні ураження електричним струмом складають 2,7 % від загального числа смертельних нещасних випадків.

Види уражень електричним струмом. Виділяють два види уражень електричним струмом: електричні травми й електричні удари.

Електричні травми – це місцеві ураження тканин і органів електричним струмом: опіки, електричні знаки й електрометалізація шкіри.

Опіки можливі при проходженні через тіло людини значних струмів (більше 1 *А*). У цьому випадку струм нагріває поверхню тіла людини до температури 60 – 70 °*С*. В електроустановках напругою вище 1000 *В* опіки можуть виникати і без посереднього контакту з струмопровідними частинами, а лише при випадковому наближенні на небезпечну відстань. коли ця відстань дорівнює розрядній або менша, виникає спочатку іскровий розряд, який переходить в електричну дугу. Температура дуги досягає 4000 °*С*, і крім цього тканини тіла нагріваються струмом, який проходить через них.

Електричні знаки виникають безпосередньо при контакті зі струмопровідними частинами. Це припухлості із затверділою у вигляді мозоля шкірою жовтого або жовтувато-білого кольору, круглої чи овальної форми. Глибоке ураження живих тканин може призвести до порушення функцій ураження органу, хоч електричні знаки неболючі.

Електрометалізація шкіри – просочування поверхні шкіри частинками металів внаслідок їх випаровування і

розбризкування під дією електричного струму, наприклад при горінні дуги. Уражені ділянки шкіри стають жорсткими шерехатими і набувають кольору металу. проникло в шкіру. Наслідки уражень залежать від площі ураженої шкіри.

Механічні пошкодження (побиті місця, синці, переломи тощо). При падінні з висоти внаслідок різних нескоординованих рухів або втрати свідомості, викликаних дією струму.

Електричні удари (шок) – спостерігаються при дії малих струмів переважно до декількох сотень міліампер і відповідно при невеликих напругах, як правило, до 1000 В. При такій малій потужності виділення теплової енергії дуже мале і не призводить до появи опіків. Струм діє на нервову систему та на м'язи, причому виникає параліч уражених органів.

Невеликі струми викликають лише неприємні відчуття. Якщо струм має величину, достатню, щоб паралізувати м'язи рук, тоді людина не здатна самостійно звільнитися від струмопровідних частин, дія струму буде тривалою.

Струм величиною декілька десятків міліампер при дії протягом 15 – 20 *с* викликає зупинку дихання ***Фібриляція*** (неритмічне скорочення і розслаблення м'язевих волокон серця) і ***параліч серця*** може бути результатом дії струму в декілька сот міліампер при короткочасній дії. Як при паралічі так і при фібриляції робота серця самостійно не відновлюється, необхідно подати першу допомогу. В таблиці 1 подано величини постійного і змінного струму, які викликають певні дії на людину.

Смертельним є струм 100 *мА* і більше.

Поріг відчуття – це найменша величина струму, яку відчуває людина (0,5 – 1,5 *мА*).

Таблиця 1.

Струм через людину, *мА*	**Характер дії**	
	Змінний струм 50 – 60 *Гц*	**Постійний струм**
0,5 – 1,5	Початок відчуття, легке дрижання пальців рук.	Не відчувається.
2 – 3	Сильне дрижання пальців рук.	Не відчувається.
5 – 7	Судороги в руках.	Зуд, відчуття нагріву.
8 – 10	Руки важко, але ще можна відірвати від електродів. Сильні болі в пальцях, кістках рук і передпліччі.	Посилення нагріву.
20 – 25	Параліч рук, відірвати їх від електродів неможливо. Дуже сильні болі. Дихання затруднене.	Ще більше посилення нагріву. Незначне скорочення м’язів рук.
50 – 80	Параліч дихання. Початок фібриляції серця.	Сильне відчуття нагріву. Скорочення м’язів рук. Судороги, затруднене дихання.
90 – 100	Параліч дихання. При довготривалості 3 с і більше –параліч серця.	Параліч дихання.

Поріг невідпускаючого струму – це найменша величина струму, при котрій людина вже не може самостійно звільнитися від захоплених електродів через які протікає струм 6 – 10 *мА*. Струми меншої величини називають ***відпускаючими.***

3.1.2. Фактори, які визначають ураження електричним струмом

Індивідуальні особливості людини значною мірою визначають наслідок ураження. Струм, який викликає лише слабкі відчуття в однієї людини, може бути таким, що не відпускає для іншої. Характер дії при одному і тому ж значенні струму залежить від стану нервової системи й всього організму вцілому. Важливим фактором, що визначає ступінь дії на людину електричного струму є її вага та фізичний розвиток. Для жінок порогове значення струму в 1,5 разів нижче, ніж для чоловіків.

Тривалість дії струму на організм людини. Чим вона менша, тим менші наслідки. При довгій дії струму опір людини зменшується і струм збільшується до значень, що можуть викликати параліч дихання і навіть фібриляцію серця. Зупинка дихання настає не миттєво, а через декілька секунд. Причому час зменшується зі збільшенням значення струму, що приходить через органи людини.

Шлях проходження струму в тілі людини також впливає на результат ураження: струм в тілі людини проходить не обов'язково по найкоротшому шляху, що пояснюється великою різницею питомих опорів різних тканин. Найнебезпечніше для здоров'я людини проходження струму через серце і дихальні шляхи. Найменший струм через серце проходить по шляху замикання струму через нижню петлю нога-нога, під дією так званої «крокової напруги». Якщо струм достатньо великий, він викликає судороги ніг, людина падає, після чого струм вже може проходити через грудну клітку, тобто через дихальні органи і серце.

Вид і частота струму. Встановлено, що змінний струм частотою 50 – 60 *Гц* небезпечніший, ніж постійний. Однак навіть невеликий постійний струм нижче порогу відчуття при швидкому розриві кола викликає різкі болі, інколи судороги м'язів рук. Небезпека дії струму зменшу-

ється з ростом частоти, але ще при частоті 5000 Гц небезпека існує.

Опір тіла людини – це величина, яка залежить від багатьох факторів. Тіло людини має властивості ємнісного опору. Ємність тіла людини на одиницю площі контакту при напрузі близько 30В становить 0,02 – 0,03 *мкф*/*см*^{2}, для промислової частоти $f = 50$ *Гц* ємнісний опір становить $X_C = 125$ *кОм*/*см*^{2}, що майже в 50 разів більше від резистивного опору $R = 2{,}5$ *кОм*/*см*^{2}.

Найбільший електричний опір в тілі людини – це верхній роговий шар шкіри, товщина якого 0,05 – 0,2 *мм*. При знятті рогового шару шкіри опір внутрішніх тканин не перевищує 800 – 1000 *Ом*. При сухій поверхні шкіри опір людини може досягати 10000 і навіть 100000 *Ом*.

Опір тіла людини залежить від:

- стану шкіри (суха, волога, чиста, пошкоджена);
- величини поверхні тіл та щільності контакту з джерелом струму;
- величини тривалості струму через людину;
- величини напруги й точок її прикладання до тіла людини;
- температури навколишнього середовища;
- стану людини (здоров'я, степені втоми, наявності в організмі алкоголю).

Якщо шкіра спітніла, волога, покрита провідним металевим порохом, содовим розчином, тоді опір людини значно зменшується. Найбільший опір людини має шкіра на долонях і на ступнях.

Висока температура у виробничих приміщеннях викликає підвищену спітнілість і зволоження шкіри, що значно зменшує опір верхнього шару шкіри, а також всіх тканин людини.

Опірність тіла людини дії електричного струму залежить також від величини прикладеної до неї напруги. При підвищенні напруги величина загального опору шкіри

знижується і при напрузі 200 – 250 *В* наближується до нуля. А при напрузі 300 *В* майже миттєво наступає пробій верхнього шару шкіри. Усереднене значення опору тіла людини – **1000 *Ом.*** Цей опір має значення при струмах, що не відпускають. Під час смертельного ураження опір тіла знижується до 700 *Ом*. При струмі що не відпускає, опір тіла людини переважно не нижчий 200 – 2500 *Ом*.

3.1.3. Допустиме значення струму через людину

Значення допустимого струму необхідно вибирати з тих порогових значень, при яких настає реальна небезпека. Так в нормальних умовах небезпека виникає при струмі, що не відпускається, при цьорму людина не в стані самостійно звільнитися. Тому не допустимо, щоб через людину будь-який час проходив струм, більший від допустимого. Згідно з таблиці 1, за найбільший довготривалий струм через людину при випадковому потрібно приймати поріг струму, що відпускає, який дорівнює 10 *мА*.

Якщо людина в процесі роботи має контакт з частинами, які знаходяться під напругою, довготривалий струм необхідно приймати не більше за 5 *мА*. ***Довготривалий допустимий струм $I_{д.д.}$* = 10 *мА.*** Як короткочасні допустимі струми приймають найбільші струми, які ще не викликають фібриляцію серця протягом певного часу їх дії. ***Довготривала напруга дотику* 20 *В.*** В таблиці 2 подані значення короткочасних допустимих струмів та напруг.

Нещасні випадки при користуванні електричним устаткуванням у переважній більшості трапляються внаслідок порушення правил техніки безпеки. Тому, згідно правил техніки безпеки працювати з електрообладнанням, обслуговувати працюючі електроустановки дозволяється тільки працівникам, які засвідчили знання правил техніки безпеки, отримали відповідний інструктаж про особливості роботи з обладнанням і зобов’язались виконувати необхідні захисні заходи.

Таблиця 2.

	Нормована величина	Довготривалість дії струму, *с*							
		0,1	0,2	0,5	0,7	1,0	3,0	3 – 10	
Напруга до 1 *кВ* при 50 *Гц*, ізольована і заземлена нейтраль	$U_{дот}$, *В*	500	250	100	75	50	36	36	12
Напруга від 1 до 35 *кВ* при ізольованій нейтралі	I_h, *мА*	500	250	100	75	50	6	6	6
Постійний струм	$U_{дот}$, *В*	500	400	250	200	150	100	100	50
	I_h, *мА*	500	400	200	150	150	50	50	25

3.2. Загальні вимоги правил техніки безпеки

1. Перед початком робіт, пов'язаних з використанням електрообладнання лабораторій кафедри, дану інструкцію повинні вивчити всі особи. Прослухавши інструктаж викладача з техніки безпеки, необхідно підписатися в журналі інструктажу, який зберігається у завідувача кафедри. Особи, не ознайомлені з даною інструкцією до виконання лабораторних робіт ***не допускаються***.

2. Виконувати в лабораторіях будь-які роботи не передбачені навчальним процесом, або не доручені адміністрацією чи викладачем, категорично ***забороняється***.

3. Переходити з одного робочого місця на інше можна лише з дозволу викладача.

4. Знаходитися в лабораторії у верхньому одязі, працювати в накинутих на плечі шарфах, хустинах, неприпнятих краватках і т.п. забороняється, тому що кінці перелічених предметів одягу можуть потрапити на обертові частини установки, що може спричинити нещасний випадок.

5. Робочими напругами в лабораторіях кафедри є напруги 110 *В* і 220 *В* змінного струму промислової частоти.

6. Доторкання до струмопровідних частин, що знаходяться під напругою, може призвести до тяжких електротравм. Тому при всіх видах робіт на діючих установках слід бути особливо обережним.

7. Контроль за виконанням даної інструкції під час лабораторних занять покладається на викладача, що веде заняття.

8. Контроль за виконанням даної інструкції в лабораторіях кафедри покладається на завідувача кафедри.

9. Особи, які порушили дану інструкцію, несуть адміністративну чи кримінальну відповідальність залежно від ступеня, характеру порушення та його наслідків.

3.3. Спеціальні вимоги правил техніки безпеки

3.3.1. Заходи безпеки перед початком роботи

1. До початку роботи студенти зобов'язані підготовити робоче місце й отримати допуск. Для цього потрібно:

1.1. Ознайомитися з приладами на лабораторному столі.

1.2. Представити формуляр лабораторної роботи та звіт за попередню.

1.3. Пояснити мету, схеми увімкнення та методику проведення роботи.

1.4. Відповісти на питання, що відносяться до змісту роботи.

2. Непідготовлені студенти до проведення лабораторної роботи ***не допускаються***.

3. Отримавши дозвіл викладача, студенти повинні зібрати схему для проведення експерименту.

4. Для під'єднання електричних приладів до робочих щитків застосовуються тільки провідники з напаяними наконечниками. При використанні вольтметра для вимірювання напруги на різних ділянках кола необхідно користуватися щупами.

5 Подача напруги в лабораторні приміщення з головного щита здійснюється викладачем, який проводить заняття, або лаборантом з попередньою перевіркою безпеки подачі напруги. Здійснювати будь-які перемикання на головному щиті студентам чи особам, які не є співробітниками кафедри, категорично ***забороняється***.

6 Напруга до схем подається через автоматичні вимикачі.

3.3.2. Заходи безпеки під час виконання роботи

1. Складання схеми та перемикання в ній повинні здійснюватися при вимкнених автоматичних вимикачах на робочих щитах.

2. Увімкнення та випробування зібраних схем, апаратури, агрегатів й електричних машин без їх попередньої перевірки викладачем категорично ***забороняється***.

3. Самостійно вносити та здійснювати будь-які зміни та перемикання в робочих схемах лабораторної роботи, не передбачені експериментом, ***забороняється***.

4. Перемикання в робочій схемі, передбачені експериментом здійснюються тільки з дозволу викладача після вимкнення електроживлення та після повної зупинки агрегату, тому що на машинах, які продовжують обертатися, можлива наявність напруги.

5. Особливо обережним слід бути під час роботи з повзунковими реостатами. Необхідно стежити, щоб руки не торкалися частин, які знаходяться під напругою.

6. Під час тимчасового припинення роботи схема повинна бути від'єднана від джерела живлення.

7. Забороняється залишати без нагляду схему, що знаходиться під напругою.

8. Під час нещасного випадку викладач чи будь-який очевидець зобов'язаний надати потерпілому першу допомогу і при необхідності негайно викликати медичну допомогу за телефоном, повідомивши адресу та місце, в якому знаходиться лабораторія. Самому, або доручивши іншій особі, без затримки провести лікаря до потерпілого.

8.1. Терміново доповісти завідувачу кафедри чи його заступникові про випадок.

8.2. Завідувач кафедрою зобов'язаний негайно повідомити про нещасний випадок ректорові університету і довести до відома профком університету, а опісля протягом 24 годин:

а) розслідувати з участю громадського інспектора з ТБ й охорони праці профбюро факультету обставини та встановити причину випадку;

б) скласти в 4-х екземплярах акт про нещасний випадок і подати його керівництву університету.

3.3.3. Заходи безпеки після закінчення роботи

1. Вся комутаційна апаратура стенду, яка подає електроживлення, повинна бути вимкнена**.**

2. Всі провідники, що тимчасово подають напругу в електричну установку, повинні бути від'єднані.

3. Привести робоче місце у вихідне положення. Прилади та крісла поставити на своє місце. Прибрати робоче місце.

4. Здати провідники викладачеві.

3.4. Протипожежна безпека

1. У випадку виявлення несправностей у схемах чи на щитках належить негайно вимкнути схему від напруги

живлення і про несправність повідомити лаборанту, чи викладачеві.

2. У випадку виникнення пожежі негайно приступити до її погашення наявними засобами. При загоранні, електричних провідників необхідно знеструмити їх шляхом вимкнення комутаційної апаратури та приступити до погашення. У випадку необхідності викликати пожежну службу за телефоном, при цьому повідомити адресу виникнення пожежі та своє прізвище.

3. Організувати евакуацію людей і майна.

4. Зустріти пожежний підрозділ.

3.5. Заходи долікарської допомоги під час нещасних випадків

Умовою успіху надання першої допомоги потерпілим від електричного струму є швидкість дій і кмітливість. Затримка може призвести до смерті потерпілого. Неможна відмовлятися від надання допомоги потерпілому та вважати його мертвим з огляду на відсутність дихання, серцебиття, пульсу. Під час ураження електричним струмом ці ознаки часто помилково приймають підтверджуючими смертельний вислід.

3.5.1. Звільнення від електричного струму

1. Доторкання до струмопровідних частин, які знаходяться під напругою, викликають мимоволі судорожні скорочення м’язів. У наслідок цього пальці, якщо потерпілий тримає провідник руками, можуть так сильно стискатися, що вивільнити провідник із його рук стає неможливим.

2. Якщо потерпілий продовжує доторкатися до струмопровідних частин, необхідно швидко звільнити його від дії електричного струму. При цьому слід мати на увазі, що доторкатися до людини, яка знаходиться під струмом,

без застосування належних заходів безпеки, небезпечне для життя того, що надає допомогу. Тому той, хто надає допомогу, повинен швидко вимкнути ту частину установки, до якої доторкається потерпілий.

3. Для відокремлення потерпілого від струмопровідних частин чи провідника належить скористуватися сухим одягом, канатом, палкою, дошкою чи будь-яким іншим предметом, що не проводить електричного струму. Для відокремлення потерпілого від струмопровідних частин можна також взятися за його одяг (якщо він сухий і відстає від тіла), наприклад, за поли блузи, уникаючи при цьому доторкання до оточуючих металічних предметів і частин тіла, не прикритих одягом.

4. Для ізоляції рук, той, хто надає допомогу, повинен надягнути діелектричні рукавиці чи обмотати обидві руки шарфом, надягнути на руки суконну кепку, опустити на руки рукав блузи чи пальто, використати прорезинену тканину чи просто суху матерію. Можна також використати предмети, які не проводять електричний струм (суху дошку, килимок тощо).

5. Під час відокремлення потерпілого від струмопровідних частин рекомендується діяти по можливості однією рукою. Після звільнення від дії електричного струму необхідно негайно викликати лікаря і надати потерпілому першу допомогу.

3.5.2. Заходи першої допомоги потерпілому від електричного струму

Заходи першої допомоги залежать від стану, в якому знаходиться потерпілий після звільнення від електричного струму.

Для визначення цього стану необхідно негайно вжити наступних заходів:

1. Покласти потерпілого на спину на тверду поверхню.

2. Перевірити наявність у потерпілого дихання (визначається за підніманням грудної клітки чи будь-якими іншими ознаками).

3. Перевірити наявність пульсу на променевій артерії при зап'ясті чи на сонній артерії на передньо-боковій поверхні шиї.

4. Виявити стан зіниці (вузька чи широка), широка зіниця вказує на різке погіршення кровопостачання мозку.

5. У всіх випадках ураження електричним струмом обов'язково викликати лікаря незалежно від стану потерпілого.

6. При відсутності у потерпілого ознак життя (дихання та пульсу) не можна вважати його мертвим, оскільки можливі випадки клінічної смерті.

3.5.3. Основні правила проведення штучного дихання та масажу серця

1. Найефективнішим способом оживлення організму, ураженого струмом, є спосіб штучного дихання «рот в рот» одночасно з непрямим масажем серця.

2. Штучне дихання належить проводити тільки у випадку, коли потерпілий дихає дуже погано, а також, якщо дихання поступово погіршується.

3. Починати штучне дихання необхідно відразу ж після звільнення потерпілого від струмопровідних частин. Провести штучне дихання після того, коли потерпілий почне дихати самостійно та рівномірно не слід, тому що це може спричинити лише шкоду.

4. Перед тим як приступити до штучного дихання, необхідно:

- покласти потерпілого на спину, підкласти під шию валок зі скрученого одягу і, наскільки можливо, закинути голову назад,до положення при якому відкривається рот;

- швидко звільнити потерпілого від одягу, який його стискає.

- швидко звільнити рот потерпілого від сторонніх предметів і слизу;

- якщо рот потерпілого затиснутий міцно, відкрити його шляхом висунення нижньої щелепи. Якщо таким чином розкрити рот не вдасться, до кута рота між задніми корінними зубами (але не передніми) обережно, щоб не зламати зуби, вставити лощинку, металічну пластинку, ручку чи подібний предмет і з їх допомогою розтиснути зуби.

- закрити потерпілому ніс і набравши повні легені повітря, вдихнути у відкритий рот, щільно притуливши свої губи до губ потерпілого. Вдихання можна робити через чисту тканину, марлю або носову хусточку.

- після наповнення легенів потерпілого повітрям потрібно дати можливість виходу повітря з легенів, для чого звільнити рот і ніс. Такі операції потрібно ритмічно повторювати з частотою 10 – 12 разів за хвилину.

5. Після того, як з'являться ознаки першого слабкого дихання, потрібно ритм штучного дихання узгодити з диханням людини, якій роблять штучне дихання. Це потрібно продовжувати робити до відновлення власного дихання, глибокого і ритмічного.

6. Штучне дихання не можна припиняти до прибуття лікаря.

7. Для того, щоб робити зовнішній масаж серця потрібно:

- потерпілого покласти на тверду поверхню – стіл, лавку, дерев'яну підлогу.

- звільнити від тісних предметів грудну клітку

- опуститись на коліна, покласти долоню на ліву частину грудної клітки на відстані приблизно 1/3 від її ниж-

нього краю. Поверх руки, покладеної на грудну клітку, покласти другу руку, випростати руки у ліктях і натискувати під прямим кутом на грудну клітку, допомагаючи при цьому корпусом свого тіла. Натискувати слід швидкими поштовхами і так, щоб прогин клітки був не менший 3-4 см. Після кожного поштовху натиск на грудну клітку слід затримати на 0,5 с. Натискування треба робити з інтервалом приблизно в 1с.

8. Одночасно робити штучне дихання і зовнішній масаж серця забороняється, тому що під час зовнішнього масажу серця повітря витискується з легенів і штучне дихання буде малоефективним.

9. Перші ознаки того, що потерпілий виходить з шокового стану наступні: звужуються зіниці очей, обличчя набуває рожевого відтінку, з'являються слабке дихання і пульс.

10. Продовжувати робити штучне дихання після того, як з'явилось самостійне рівномірне дихання, не потрібно, тому що це може причинити шкоду.

Дана інструкція поширюється на всі види навчальних та інших робіт, які проводяться на кафедрі викладацьким і навчально-обслуговючим персоналом.

ДОДАТКИ

Додаток 1. Допоміжні таблиці

Грецький алфавіт

Букви	Назва букви	Букви	Назва букви
A, α	альфа	N, ν	ню
B, β	бета	Ξ, ξ	кси
Γ, γ	гамма	O, o	омікрон
Δ, δ	дельта	Π, π	пі
E, ε	епсилон	P, ρ	ро
Z, ζ	дзета	Σ, σ	сигма
H, η	ета	T, τ	тау
Θ, $\vartheta(\theta)$	тета	Y, υ	іпсилон
I, ι	йота	Φ, φ	фі
K, κ	каппа	X, χ	хі
Λ, λ	ламбда	Ψ, ψ	пси
M, μ	мю	Ω, ω	омега

Утворення кратних і дольних одиниць вимірювання

Множник	Приставка	Скороч. познач.
10^{18}	Екса	Е
10^{15}	Пета	П
10^{12}	Тера	Т
10^{9}	Гіга	Г
10^{6}	Мега	М
10^{3}	кіло	к
10^{2}	гекто	г
10^{1}	дека	да

Множник	Приставка	Скороч. познач.
10^{-1}	деци	д
10^{-2}	санти	с
10^{-3}	мілі	м
10^{-6}	мікро	мк
10^{-9}	нано	н
10^{-12}	піко	п
10^{-15}	фемто	ф
10^{-18}	атто	а

Одиниці вимірювання електричних та магнітних величин

Назва величини	Одиниці вимірювання	Скорочення позначення
Сила електричного струму	ампер	*А*
Електрична напруга	вольт	*В*
Напруженість електричного поля	вольт на метр	*В/м*
Електричний опір	ом	*Ом*
Електрична провідність	сіменс	*См*
Електрична ємність	фарада	*Ф*
Індуктивність	генрі	*Гн*
Магнітна індукція	тесла	*Тл*
Магнітний потік	вебер	*Вб*
Напруженість магнітного поля	ампер на метр	*А/м*

Питомий опір, провідність та температурний коефіцієнт опору матеріалів

Матеріал	Питомий опір ρ при т-рі 20 °С, $Ом \cdot мм^2 \cdot м^{-1}$	Питома провідність γ, $м \cdot Ом^{-1} \cdot мм^{-2}$	Середній температ. коефіц. опору, α, $°С^{-1}$
алюміній	0,0285	35,0	0,004
вольфрам	0,053	19,0	0,005
золото	0,022	45,4	–
константан	0,48	2,08	0,00004
латунь	0,071	14,08	0,002
манганін	2,5 – 2,08	0,4 – 0,48	0,000006
мідь	0,0175	57,0	0,00393
ніхром	0,910	1,1	0,0001
олово	0,12	8,3	–
платина	0,1	10	0,004
ртуть	0,958	1,04	0,0009
свинець	0,217	4,6	0,004
срібло	0,016	62,0	0,004
сталь	0,13	7,7	0,00625
фехраль	1,4	0,71	0,0002

Додаток 2. Приклади розв'язування типових рівнянь та зображення електричних величин

Приклад розв'язування системи лінійних рівнянь методом Гауса

Розглянемо на прикладі один з варіантів методу послідовного виключення елементів (метод Гауса). Нехай нам задана система рівнянь:

$$67I_1 - 30I_2 - 12I_3 = 140\ , \qquad (1)$$

$$-30I_1 + 106I_2 - 34I_3 = -80\,, \qquad (2)$$

$$-12I_1 - 34I_2 + 64I_3 = -10\ . \qquad (3)$$

Розділимо рівняння системи на коефіцієнти, які стоять в кожному з них при одному і тому ж невідомому, в даному випадку при I_1. Перше рівняння поділимо на 67, друге – на –30 і третє – на –12. Одержимо

$$I_1 - 0,4478I_2 - 0,1791I_3 = 2,0896, \qquad (4)$$

$$I_1 - 3,533I_2 + 1,1333I_3 = 2,6667, \qquad (5)$$

$$I_1 + 2,8333I_2 - 5,3333I_3 = 0,8333. \qquad (6)$$

Віднімемо від рівняння (4) рівняння (5), а від рівняння (5) – рівняння (6), і отримаємо наступні рівняння:

$$I_1 - I_1 - 0,4478I_2 - \left(-3,533I_2\right) - 1791I_3 -$$

$$-1,1333I_3 = 2,0896 - 2,6667; \qquad I_1 - I_1 - 3,533I_2 - 2,8333I_2 +$$

$$+1,1333I_3 - (7)\left(-5,3333I_3\right) = 2,6667 - 0,8333,$$

$$3,0856I_2 - 1,3124 = -0,5771\,, \qquad (7)$$

$$-6,366I_2 + 6,4667I_3 = 1,8334\,. \qquad (8)$$

Ми отримали систему лінійних рівнянь.

Ділимо кожне рівняння на коефіцієнти, які стоять при I_2, тобто рівняння (7) ділимо на 3,0856, а рівняння (8) на –6,366.Одержимо:

$$I_2 - 0,4253I_3 = -0,1870\,, \qquad (9)$$

$$I_2 - 1,0157I_3 = -0,2880. \qquad (10)$$

Від десятого рівняння віднімаємо дев'яте і одержимо:

$$I_2 - I_2 - 1,0157I_3 - \left(-0,4253I_3\right) = -0,1870 - \left(-0,2880\right),$$

звідки $I_3 = 0,171$. Тепер підставляємо знайдене значення I_3 в рівняння (9) і знаходимо I_2.

$$I_2 - 0,4253 \cdot 0,171_3 = -0,1870; \qquad I_2 = -0,1142\ A.$$

Підставляючи значення I_2 та I_3 в рівняння (4) визначаємо I_1.

$$I_1 - 0,4478 \cdot \left(-0,1142\right) - 0,1791 \cdot 0,171_3;$$

$$I_1 = 2,0896 + 0,0306 - 0,051 = 2,069;$$

$$I_1 = 2,069\ A.$$

Приклад розв'язування системи лінійних рівнянь методом Крамера

Розглянемо на прикладі систему рівнянь.:

$$3I_1 + 3I_2 - 4I_3 = 10,$$

$$4I_1 + 3I_2 - 3I_3 = 10,$$

$$1I_1 + I_2 - 8I_3 = 10.$$

Складемо і обчислимо визначники:

$$\Delta = \begin{vmatrix} 3 & 3 & -4 \\ 4 & 3 & -3 \\ 1 & 1 & -8 \end{vmatrix} = 3\begin{vmatrix} 3 & -3 \\ 1 & -8 \end{vmatrix} - 3\begin{vmatrix} 4 & -3 \\ 1 & -8 \end{vmatrix} + \left(-4\right)\begin{vmatrix} 4 & 3 \\ 1 & 1 \end{vmatrix} = 20.$$

$$\Delta I_1 = \begin{vmatrix} 10 & 3 & -4 \\ 10 & 3 & -3 \\ 10 & 1 & -8 \end{vmatrix} = 10\begin{vmatrix} 3 & -3 \\ 1 & -8 \end{vmatrix} - 3\begin{vmatrix} 10 & -3 \\ 10 & -8 \end{vmatrix} + \left(-4\right)\begin{vmatrix} 10 & 3 \\ 10 & 1 \end{vmatrix} = 20.$$

$$\Delta I_2 = \begin{vmatrix} 3 & 10 & -4 \\ 4 & 10 & -3 \\ 1 & 10 & -8 \end{vmatrix} = 3\begin{vmatrix} 10 & -3 \\ 10 & -8 \end{vmatrix} - 10\begin{vmatrix} 4 & -3 \\ 1 & -8 \end{vmatrix} + (-4)\begin{vmatrix} 4 & 10 \\ 1 & 10 \end{vmatrix} = 20.$$

$$\Delta I_3 = \begin{vmatrix} 3 & 3 & 10 \\ 4 & 3 & 10 \\ 1 & 1 & 10 \end{vmatrix} = 3\begin{vmatrix} 3 & 10 \\ 1 & 10 \end{vmatrix} - 3\begin{vmatrix} 4 & 10 \\ 1 & 10 \end{vmatrix} + 10\begin{vmatrix} 4 & 3 \\ 1 & 1 \end{vmatrix} = -20.$$

Невідомі струми I_1, I_2 та I_3 визначаємо за формулами:

$$I_1 = \frac{\Delta I_1}{\Delta} = \frac{20}{20} = 1\ A,$$

$$I_2 = \frac{\Delta I_2}{\Delta} = \frac{20}{20} = 1\ A,$$

$$I_3 = \frac{\Delta I_3}{\Delta} = \frac{20}{-20} = -1\ A.$$

Зображення синусоїдних величин на комплексній площині

Під час розрахунку процесів в електричних колах змінного струму необхідно виконувати арифметичні операції над синусоїдними величинами. Наприклад, необхідно знайти суму кількох струмів тощо. Безпосереднє додавання гармонічних функцій часу пов'язане з громіздкими і трудомісткими перетвореннями. Суттєве спрощення розрахунків досягається, якщо перейти від синусоїдних функцій часу до їх зображень за допомогою комплексних чисел.

З курсу математики відомо, що комплексне число $\underline{A} = a + jb$ має дві складові: ***дійсну a*** та ***уявну b***, котрі є координатами точки на комплексні площині, рис. 49.

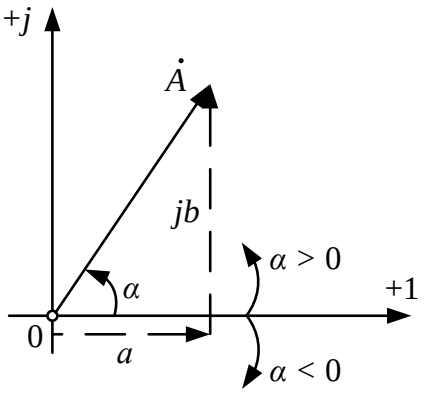


Рис.49. Зображення комплексного числа на площині

На комплексній площині з прямокутною системою координат по осі абцис, яку називають ***віссю дійсних чисел*** і позначають (+1) і (–1), відкладають дійсну складову комплексного числа *a*, а по осі ординат, яку називають ***віссю уявних чисел*** й позначають (+*j*) і (–*j*) відкладають уявну складову комплексного числа *b*, де $j = \sqrt{-1}$. Комплексне число позначається великою літерою підкресленою знизу. Комплексне число може бути зображене вектором, довжина якого називається ***модулем комплексного числа***, а положення визначається ***кутом (аргументом)*** α відносно додатної дійсної півосі комплексної площини.

Використовуються такі ***форми запису комплексного числа***:

– алгебрична $\underline{A} = a + jb$;

– тригонометрична $\underline{A} = \underline{A}\left(\cos\alpha + j\sin\alpha\right)$;

– показникова $\underline{A} = Ae^{j\alpha}$.

$a = A\cos\alpha$, $b = A\sin\alpha$ – дійсна та уявна складові,

$A = \sqrt{a^2 + b^2}$ – ***модуль*** комплексного числа,

$\alpha = arctg\dfrac{b}{a}$ – ***аргумент*** комплексного числа.

Кут α на комплексній площині відкладається від дійсної півосі абсцис проти годинникової стрілки, якщо $\alpha > 0$; та за годинниковою стрілкою якщо $\alpha < 0$. Під час визначення кута α треба враховувати, в якій чверті комплексної площини розташований вектор, а саме:

$a < b,\ \ b > 0\ \ (2\,\textit{чверть})\ \ \alpha = \pi - arctg\dfrac{b}{|a|};$

$a < 0,\ \ b < 0\ \ (3\,\textit{чверть})\ \ \alpha = \pi + arctg\dfrac{|b|}{|a|};$

$a > 0,\ \ b > 0\ \ (4\,\textit{чверть})\ \ \alpha = -arctg\dfrac{|b|}{|a|}.$

Формула Ейлера вказує на зв'язок між показниковим та тригонометричним записом комплексного числа $e^{\pm j\alpha} = \cos\alpha \pm j\sin\alpha = \exp(\pm ja)$ і дає змогу переходити від однієї форми запису комплексного числа до іншої.

Додавання чи віднімання двох або більше комплексних чисел можна виконати аналітично:

$$\underline{A} = \underline{A}_1 \pm \underline{A}_2 = a + jb.$$

Добуток двох комплексних чисел:

$$\underline{A} = \underline{A}_1 \cdot \underline{A}_2 = \underline{A}_1 \cdot \underline{A}_2 e^{j(\alpha_1+\alpha_2)},$$

або в алгебраїчній формі:

$$\underline{A} = \underline{A}_1 \cdot \underline{A}_2 = (a_1a_2 - b_1b_2) + j(a_1b_2 + a_2b_1).$$

Ділення комплексних чисел:

$$\underline{A} = \frac{\underline{A}_1}{\underline{A}_2} = \frac{\underline{A}_1 e^{j\alpha_1}}{\underline{A}_2 e^{j\alpha_2}} = \frac{\underline{A}}{\underline{A}_2} e^{j(\alpha_1-\alpha_2)},$$

або в алгебраїчній формі:

$$\underline{A} = \frac{\underline{A}_1}{\underline{A}_2} \frac{a_1 a_2 - b_1 b_2}{a_2^2 + b_2^2} + j \frac{a_2 b_1 - a_1 b_2}{a_2^2 + b_2^2}.$$

Приклад 1. Записати комплексне число $\underline{A} = 5e^{-60^\circ}$ в алгебраїчній формі.

Розв'язок. Для перетворення показникової форми комплексного числа в алгебраїчну використовуємо формулу:

$$\underline{A} = 5e^{-60^\circ} = 5\cos\left(-60^\circ\right) + j5\sin\left(-60^\circ\right) = 2,5 - j4,33.$$

Приклад 2. Комплексне число $\underline{A} = -18 + j8$ подати в показниковій формі.

Розв'язок. Вектор, що відображає задане комплексне число, розташований в другій чверті комплексної площини, тому для запису його показникової форми використовуємо такі вирази:

модуль комплексного числа $\sqrt{(-18)^2 + 8^2} = 19,7$,

аргумент комплексного числа

$$\alpha = \pi - arctg \frac{b}{|a|} = 180^\circ - arctg \frac{8}{|-18|} = 156,04^\circ.$$

Отже, $\underline{A} = -18 + j8 = \underline{A} = 19,7e^{-j156,04^\circ}$.

Приклад 3. Відняти два комплексних числа

$$\underline{A}_1 = 30e^{-j70^\circ} \quad \text{і} \quad \underline{A}_2 = 20e^{j20^\circ}.$$

Розв'язок. Віднімання виконуватимемо в алгебраїчній формі

$$\underline{A}_1 = 30e^{-j70^\circ} = 30\cos\left(-70^\circ\right) + j30\sin\left(-70^\circ\right) = 10,26 - j28,195$$

$$\underline{A}_2 = 20e^{j20^\circ} = 20\cos\left(20^\circ\right) + j20\sin\left(20^\circ\right) = 18,79 + j6,84,$$

тоді $30e^{-j70^\circ} - 20e^{j20^\circ} = 10,26 - j28,195 - 18,79 + j6,84 = -8,53 - j35,03.$

Приклад 4. Помножити два комплексних числа $\underline{A}_1 = 4e^{j38^\circ}$ і $\underline{A}_2 = 5e^{-j60^\circ}$.

Розв'язок. Для множення двох комплексних чисел в показниковій формі застосовуємо формулу

$$\underline{A} = \underline{A}_1 \cdot \underline{A}_2 = \underline{A}_1 \cdot \underline{A}_2 e^{j(\alpha_1+\alpha_2)} = 4 \cdot 5e^{j(38+(-60))} = 20e^{j(-22)}.$$

Приклад 5. Поділити два комплексних числа

$$\underline{A}_1 = 4e^{j38^\circ} \quad \text{і} \quad \underline{A}_2 = 5e^{-j60^\circ}.$$

Розв'язок. Для ділення двох комплексних чисел в показниковій формі застосовуємо формулу

$$\underline{A} = \frac{\underline{A}_1}{\underline{A}_2} = \frac{\underline{A}_1 e^{j\alpha_1}}{\underline{A}_2 e^{j\alpha_2}} = \frac{\underline{A}}{\underline{A}_2} e^{j(\alpha_1-\alpha_2)} = \frac{4e^{j38}}{5e^{j(-60)}} = 0,8e^{j98}.$$

$$\underline{A} = \underline{A}_1 \cdot \underline{A}_2 = \underline{A}_1 \cdot \underline{A}_2 e^{j(\alpha_1+\alpha_2)} = 4 \cdot 5e^{j(38+(-60))} = 20e^{j(-22)}.$$

Розглянемо декілька прикладів переходу від миттєвого значення синусоїдної величини до її комплексного відображення і навпаки:

$$i_1 = 14,1\sin\omega t^{-1} \qquad \rightarrow \qquad \underline{I}_1 = \frac{14,1}{\sqrt{2}} e^{j0^\circ} = 10$$

$$i_2 = 5\sqrt{2}\sin\left(\omega t - 60^\circ\right) \rightarrow \qquad \underline{I}_2 = \frac{5\sqrt{2}}{\sqrt{2}} e^{-j60^\circ} = 5e^{-j60^\circ}$$

$$u_1 = 220\sqrt{2}\cos\omega t = 220\sqrt{2}\sin\left(\omega t + 90^\circ\right) \rightarrow \underline{U}_1 = \frac{220\sqrt{2}}{\sqrt{2}} e^{j90^\circ} = j220.$$

Зворотній перехід:

$$\underline{I}_3 = 5 \quad \rightarrow \quad i_3 = 5\sqrt{2}\sin\omega t$$

$$\underline{I}_4 = 10e^{-j50^\circ} \quad \rightarrow \quad i_4 = 10\sqrt{2}\sin\left(\omega t - 50^\circ\right)$$

$$\underline{U}_2 = 50 + j50 = 50\sqrt{2}e^{45^\circ} \quad \rightarrow \quad u_2 = 100\sin\left(\omega t + 45^\circ\right).$$

Закон Ома в комплексній формі

До кола з послідовним з'єднанням елементів *R*, *L*, *C* (рис. 50) прикладено синусоїдну напругу, під дією якої проходитиме синусоїдний струм, їх комплексні зображення будуть *U* та *I*:

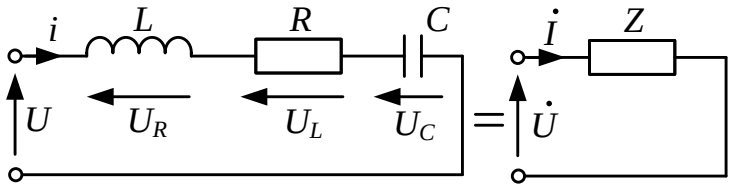


Рис.50. Послідовне з'єднання елементів R, L, C

$$u = U_m \sin\left(\omega t + \psi_i\right) \; \underline{U} = \frac{U_m}{\sqrt{2}} e^{j\psi_u} = U e^{j\psi_u}$$

$$i = I_m \sin\left(\omega t + \psi_i\right) \; \underline{I} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} e^{j\psi_i} = I e^{j\psi_i}$$

Для замкненого контуру за другим законом Кірхгофа запишемо рівняння для миттєвих значень напруг: $u = u_R + u_L + u_C$, або в комплексній формі:

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

де $\underline{U}_R = R\underline{I}$ – збігається за фазою зі струмом;

$\underline{U}_L = \underline{I}X_L e^{j\frac{\pi}{2}} = +jX_L\underline{I}$ – випереджає струм на 90°;

$\underline{U}_C = \underline{I}X_C e^{-j\frac{\pi}{2}} = -jX_C\underline{I}$ – відстає від струму на 90°.

Підставляючи ці значення, одержимо:

$$\underline{U} = R\underline{I} + jX_L\underline{I} - jX_C\underline{I} = \left[R + j\left(X_L - X_C\right)\underline{I}\right] = Z\underline{I} \; .$$

Це рівняння закон Ома в символічній (чи комплексній) формі.

$$\text{Опір } \underline{Z} = R + jX = R + j\left(X_L + X_C\right) = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)$$

називається ***комплексним повним опором схеми***, позначається великою літерою Z з рискою знизу.

При відомих комплексних значеннях струму і напруги комплексний опір визначається як:

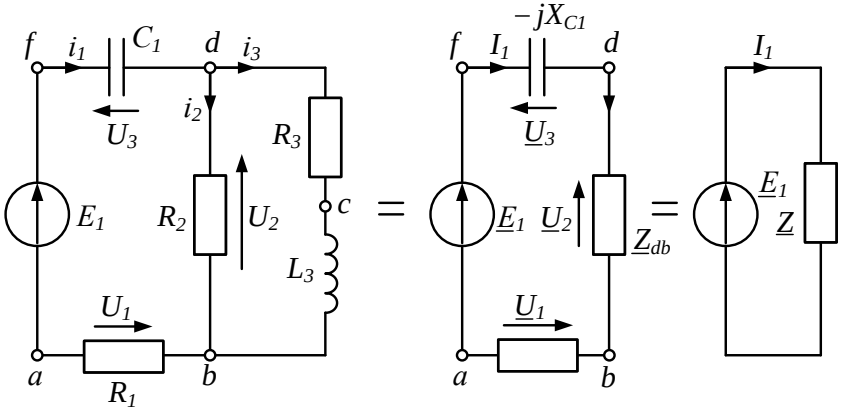
$$\underline{Z} = \frac{\underline{U}}{\underline{I}} = \frac{Ue^{j\psi_u}}{Ie^{j\psi i}} = \frac{U}{I}e^{j(\psi_u - \psi_i)} = Ze^{j\varphi} = Z\cos\varphi + jZ\sin\varphi = R + jX$$

$$\varphi = \left(\psi_u - \psi_i\right) \quad R = Z\cos\varphi \quad X = Z\sin\varphi.$$

Величина, обернена комплексному опорові, називається ***комплексною провідністю***:

$$\underline{Y} = \frac{1}{\underline{Z}} = \frac{1}{Ze^{j\psi}} = Ye^{-j\psi} = Y\cos\varphi + jY\sin\varphi = G - jB\,.$$

Приклад 1. Параметри електричного кола, зображеного на рисунку мають такі значення: $e_1 = 183{,}8\sin 314t\ B$, C_1 = 187,3 *мкФ*; R_1 = *1 Ом;* R_2 = *20 Ом*; R_3 = *4* Ом; L_3 = *25,48 мГн*. Визначити струми у вітках електричного кола.



а) *б)* *в)*

Розв'язок. Комплексне діюче значення *ЕРС*:

$$\underline{E}_1 = \frac{E_m}{\sqrt{2}e^{j0^\circ}} = 130\ B.$$

Реактивні опори:

$$X_{L_3} = \omega L_3 = 314 \cdot 25,48 \cdot 10^{-3} = 8\ Ом;$$

$$X_{C_1} = \frac{1}{\omega C_1} = \frac{1}{314 \cdot 187,3 \cdot 10^{-3}} = 17\ Ом.$$

Комплексний опір паралельних віток:

$$\underline{Z}_{bd} = \frac{R_2\left(R_3 + jX_{L3}\right)}{R_2 + R_3 + jX_{L3}} = \frac{20\left(4 + j8\right)}{20 + 4 + j8} = 5 + j5 = 7,07e^{j45^\circ}\ Ом.$$

Комплексний опір усього кола:

$$\underline{Z}_1 = R_1 + \underline{Z}_{bd} - jX_{c1} = 7 + 5 + j5 - j17 = 12 - j12 = 17e^{j45^\circ}\ Ом.$$

Комплексні струми і напруги в колі:

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{E}}{\underline{Z}} = \frac{130}{17e^{j45^\circ}} = 7,65e^{+j45^\circ}$$

$$\underline{U}_R = R\underline{I} = 7 \cdot 7,65e^{+j45^\circ} = 53,5\exp\left(j45^\circ\right)\ B,$$

$$\underline{U}_2 = \underline{Z}_{bd}\underline{I}_1 = 7,07\exp\left(j45^\circ\right) \cdot 7,65\exp\left(j45^\circ\right) = j54,0\ B,$$

$$\underline{U}_3 = -jX_{C1}\underline{I}_1 = -j17 \cdot 7,65\exp\left(j45^\circ\right) = 130,0\exp\left(-j45^\circ\right)\ B,$$

$$\underline{I}_3 = \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_3} = \frac{j54}{4 + j8} = 6\exp\left(j26^\circ 30'\right)\ A.$$

Додаток 3. Електровимірювальні прилади

Оскільки процеси, що відбуваються в електричних колах, для спостереження та кількісної оцінки недоступні, електровимірювальні прилади особливо важливі як засоби контролю за цими процесами. Без електровимірювальних приладів неможливі безперебійна робота деяких електро-

технічних установок і керування багатьма технологічними процесами.

Електровимірювальні прилади призначені для порівняння вимірювальної величини з іншою однорідною величиною, що приймається за одиницю і називається ***мірою.***

Електровимірювальний прилад – це технічний пристрій, що виробляє сигнал вимірювальної величини у формі, сприйнятній для спостерігача.

Робота електровимірювальних приладів полягає в переміщенні їх рухомої частини, спричинюваному механічними зусиллями, що виникають у приладі внаслідок одного з проявів електричного струму (теплового, магнітного, індукційного, електродинамічного та ін.).

Усі електровимірювальні прилади ***класифікуються*** за такими ознаками:

- за родом вимірювальної величини;
- за родом струму;
- за ступенем точності;
- за фізичним принципом роботи;
- за типом пристрою відліку;
- за стійкістю механічних впливів;
- залежно від умов експлуатації.

За ***родом вимірювальної величини*** електровимірювальні прилади класифікуються наступним чином:

Рід вимірювальної величини	Найменування приладу
струм	амперметр
напруга	вольтметр
електрична потужність	ватметр
електрична енергія	лічильник кіловат годин
опір	омметр
зсув фаз	фазометр
частота	частотомір

Загалом електровимірювальні прилади бувають аналогові (покажчик – стрілка, світлова пляма) та цифрові (покажчик – цифра).

За ***родом струму*** електровимірювальні прилади поділяються на:

- прилади, що вимірюють тільки простійний струм
- прилади, що вимірюють тільки змінний струм
- прилади, що вимірюють як постійний, так і змінний струм.

За ***ступенем точності*** електровимірювальні прилади охоплюють такі класи: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 20; 4,0; 5,0.

За ***фізичним принципом роботи*** вимірювального пристрою (електромагнітні та електронні) розділяють такі системи: магнітоелектричну, електромагнітну, електродинамічну, феродинамічну, індукційну, вібраційну, випростувальну.

За ***типом пристрою відліку*** електровимірювальні пристрої поділяються: показуючі, реєструючі, самопишучі, друкуючі, інтегруючі, сумуючі.

За ***стійкістю механічних впливів*** прилади поділяються на звичайні, нечутливі до вібрацій, віброміцні, нечутливі до трясіння, трусоміцні, удароміцні.

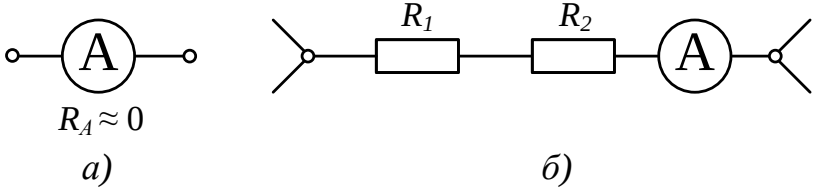
Залежно від ***умов експлуатації*** розрізняють наступні групи електровимірювальних приладів:

- ***група А:*** температура (+10 ÷+35)ºС, вологість 80 %,
- ***група Б:*** температура (–30 ÷+40)ºС, вологість 90 %,
- ***група В1***: температура (–40 ÷+50)ºС, вологість 95 %,
- ***група В2***: температура (–50 ÷+50)ºС, вологість 95 %,
- ***група В***: температура (–50 ÷+80)ºС, вологість 98.

Вимірювання електричних величин

Вимірювання струму. Сила струму в електричних колах вимірюється за допомогою приладів, які називаються ***амперметрами.***

Для визначення струму на будь-якій ділянці кола потрібно, щоб увесь струм цієї ділянки проходив через вимірювальний механізм амперметра. Це значить, що прилад, що прилад повинен бути ввімкнений в розсічення цієї ділянки кола, тобто послідовно з навантаженням рис. 51.



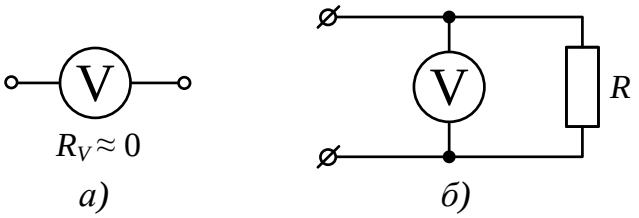
а) *б)*

Рис. 51. Схема ввімкнення амперметра

В колах постійного струму використовують прилади магнітоелектричної системи, в колах змінного струму – електромагнітної чи електродинамічної систем.

Для збільшення меж вимірювального струму застосовують шунти, а змінного – вимірювальні трансформатори струму.

Вимірювання напруги. Напруга в електричних колах вимірюється за допомогою приладів, які називаються ***вольтметрами.*** Прилад вмикають паралельно до елемента, на якому вимірюється напруга рис. 52.



а) *б)*

Рис. 52. Схема ввімкнення вольтметра

Для вимірювання напруги постійного струму у вольтметрах застосовуються всі системи, крім індукційної, а для вимірювання напруги змінного струму – всі, крім магнітоелектричної. При вимірюванні високих напруг змінного струму використовуються вимірювальні трансформатори напруги, для яких приєднуються вольтметри.

Вимірювання потужності. Потужність постійного струму можна визначити як добуток напруги та струму: $P = UI$, тобто перемноживши покази вольтметра й амперметра, ввімкнених в коло. Цей метод вимірювання потужності називається ***методом амперметра та вольтметра.***

Для вимірювання потужності існують спеціальні прилади, які називаються ***ватметрами.*** Потужність постійного струму вимірюється ватметрами електродинамічної системи, струмова обвитка яких вмикається послідовного, а напругова – паралельно до елемента.

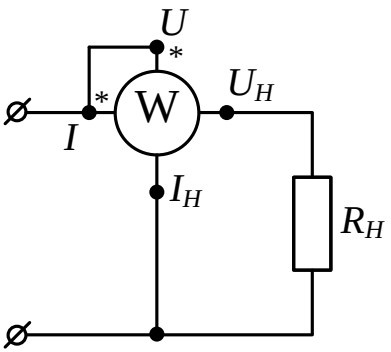
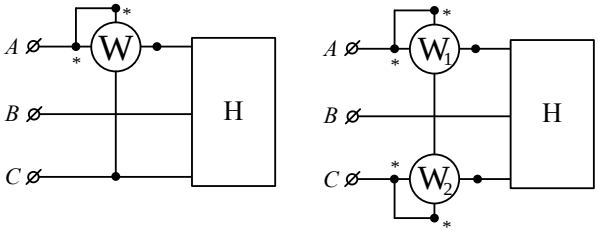


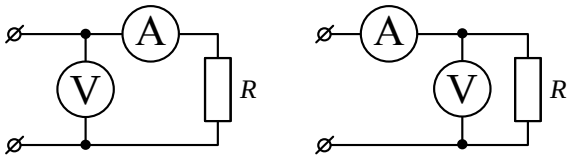
Рис. 53. Схема ввімкнення ватметра.

У трифазних колах при симетричному навантаженні використовують один ватметр рис. 54а. В трифазних колах із симетричним навантаженням за допомогою ватметра можна виміряти реактивну потужність рис. 54б.



а) *б)*

Рис. 54. Схема ввімкнення ватметрів у трифазних колах



а) *б)*

Рис. 55. Схема для вимірювання опору

Вимірювання опору. Найпростішим способом вимірювання опору є ***метод амперметра-вольтметра*** (рис. 55а). Для вимірювання малих опорів використовують схему на рис. 55б.

Безпосереднім методом вимірювання опору є використання ***омметра.*** Прилад має набір додаткових опорів та сталу ЕРС, величину похибку і нерівномірну шкалу.

Для точнішого вимірювання використовують ***мостовий метод*** (рис. 56).

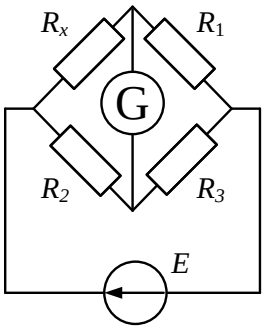


Рис. 56. Схема вимірювального моста

В цьому випадку вимірювальний опір R_x вмикають в плече моста, інші пори R_1, R_2, R_3 якого відомі. В одну з діагоналей моста вмикають магнітоелектричний гальванометр, який показує нуль за умови $R_xR_3 = R_1R_2$ звідки $R_1=R_x=R_1R_2/R_3$.

Вимірювальні мости мають декілька діапазонів вимірювання опорів від 0,01 *Ом* до 10 *МОм*.

Похибки вимірювання та похибки вимірювальних приладів

Результат будь-якого вимірювання дещо відрізняється від дійсного значення вимірювальної величини, яке визначається за зразковим приладом, звіреним з еталоном**.** Помилка у вимірюванні називається ***похибкою***.

Для характеристики точності вимірювальних приладів використовують поняття похибки, які кваліфікують: за способом виразу (абсолютні, відносні та приведені); за характером прояву (систематичні, випадкові, промахи); за умовами експлуатації.

Абсолютна похибка – це різниця між вимірюваним і дійсним значенням величини: $\Delta A = A_B - A_0$, де A_B – вимірювана величина; A_0 – дійсна величина, що виміряна точнішим приладом.

Відносна похибка – це відношення абсолютної похибки до вимірюваного значення у відсотках: $\delta = \frac{\Delta A}{A_B} 100\%$.

Приведена похибка – це відношення абсолютної похибки до номінального значення вимірювального приладу у відсотках: $\gamma = \frac{\Delta A}{A_н} 100\%$.

Якщо абсолютна та відносна похибки характеризують точність вимірювання, то приведена похибка характе-

ризує точність вимірювального приладу. За приведеною похибкою визначають клас точності.

Систематична похибка зумовлена недосконалістю вимірювального приладу, впливом зовнішніх умов. Цю похибку можна врахувати за допомогою відповідних поправок.

Випадкова похибка виникає при випадкових чинниках, які не можна безпосередньо врахувати.

Приклад 1. При вимірюванні струму одержали значення струму $I_1=25,5\ A$, тоді як діюче значення було $I=25\ A$. Визначити абсолютну і відносну похибки вимірювання.

Розв'язок. Абсолютна похибка рівна:

$$\Delta I = I_1 - I = 25,5 - 25 = 0,5\ A.$$

Відносна похибка рівна: $\delta = \dfrac{\Delta I}{I_н} 100\ \% = \dfrac{0,5}{25} \cdot 100 = 2\ \%.$

Приклад 2. Для вимірювання ЕРС. генератора до його клем в неробочому режимі (холостому ході) під'єднано вольтметр, опір якого 1200 *Ом*. Внутрішній опір генератора 0,6 *Ом*. Визначити відносну похибку, якщо показ вольтметра рівний ЕРС генератора.

Розв'язок. Відповідно до другого закону Кірхгофа для нерозгалуженого кола, що складається з генератора і вольтметра одержимо:

$$E = IR_0 + IR_v = I(R_0 + R_v) = I(1200 + 0,6) = 1200,6I\ .$$

Якщо ж наближений показ вольтметра прийняти рівним ЕРС генератора, то $E_1 = R_v I$ або $E_1 = 1200I$. Звідси абсолютна похибка, тобто різниця знайдених значень вимірювання (тобто E_1) і дійсним значенням вимірюваної величини $\Delta E = E_1 - E = 1200I - 1200,6I = -0,6I.$

Відношення абсолютної похибки ΔE до її дійсногозначення вимірюваної величини , взяте в процентах і є відносною похибкою:

$$\delta = \frac{\Delta E}{E} 100\% = \frac{-0,6I}{1200,6I} \cdot 100 = -0,05\%.$$

Ця похибка виникає від недосконалого методу вимірювання і відноситься до систематичної похибки, яка залишається при цьому методі і при дальших вимірюваннях.

Приклад 3. Номінальний струм амперметра дорівнює *5А*. Клас точності його 1,5. Визначити найбільш можливу абсолютну похибку приладу.

Розв'язок. Число 1,5, що вказує на клас точності амперметра і означає основну приведену похибку, тобто визначене в процентах відношення найбільш можливої абсолютної похибки приладу, що знаходиться в нормальних умовах, до номінальної величини ($I_н$): $\gamma = \frac{\Delta I}{I_н} 100\ \%$.

Відповідно, в формулі $\gamma = 1,5\ \%$ $\quad I_н = 5\ A.$

Підставивши числові значення знаходимо

$$1,5 = \frac{(\Delta I)_{max}}{5} 100\ \%$$

$$(\Delta I)_{max} = \frac{1,5 \cdot 5}{100} = 0,075\ A.$$

Приклад 4. Номінальний струм амперметра 5 *А,* опір амперметра 0,02 *Ом*. Який струм проходить в колі, якщо амперметр зашунтований опором 0,005 *Ом*, показує 4,5 *А*.

Розв'язок. Шунт і амперметр з'єднані паралельно. Струми, що проходять в пасивних паралельних вітках (що

не мають в своєму складі ЕРС), обернено пропорційні опорам цих віток: $\frac{I_A}{I_ш} = \frac{R_ш}{R_A}$, звідси

$$I_ш = I_A \frac{R_A}{R_ш} = 4,5 \frac{0,02}{0,005} = 18\ A.$$

Струм I в колі на основі першого закону Кірхгофа дорівнює сумі струмів через амперметр та через шунт $I_ш$:

$$I = I_A + I_ш = 4,5 + 18 = 22,5\ A.$$

Приклад 5. Через амперметр, номінальний струм якого $I_{ном}$= 5 *А* і опір 0,1 *Ом* проходить струм 4 *А*; вольтметр номінальна напруга якого $U_{ном}$ = 150 *В*. і опір 5000 *Ом* підключений на напругу U = 120 *В*. Визначити витрати потужності в цих приладах.

Розв'язок. Втрати потужності в амперметрі

$$P_A = R_A I_A^2 = 0,1 \cdot 4^2 = 1,6\ Вт.$$

Втрати потужності у вольтметрі

$$P_V = I_V U_V = \frac{U_V}{R_V} U_V = \frac{U_V^2}{R_V} = \frac{120^2}{5000} = 2,88\ Вт.$$

Отже, втрати в амперметрі тим менші, чим менший опір амперметра, а втрати вольтметра менші, коли опір вольтметра більший.

Приклад 6. Струм в колі при зростанні навантаження виріс більше ніж номінальний струм амперметра $I_н$ = 5 *А,* опір якого R_{A1} = 0,1 *Ом*. Тоді було прийнято рішення вимірювати струм двома паралельно підключеними між собою амперметрами при цьому R_{A2} = 0,08 *Ом.* Визичити покази обох амперметрів при вимірюванні сумарного струму I = 8 *А*.

Розв'язок. За першим законом Кірхгофа $I = I_{A1} + I_{A2}$ або $I_{A1} + I_{A2} = 8$.

З другого боку, відношення струмів у пасивних паралельних вітках дорівнює оберненому відношенню їх опорів:

$$\frac{I_{A1}}{I_{A2}} = \frac{R_{A1}}{R_{A2}} \text{ або } \frac{I_{A1}}{I_{A2}} = \frac{0,1}{2,25} = 1,25 .$$

Відповідно замість струму I_{A2} можна в рівняннях записати:

$$I_{A2} = 1,25 I_{A1} \quad I_{A1} + 1,25 I_{A1} = 8 \quad \rightarrow$$

$$I_{A1} = \frac{8}{2,25} = 3,56\ A. \qquad I_{A2} = 1,25 I_{A1} = 1,25 \cdot 3,56 = 4,44\ A.$$

Висновок. Недоцільно паралельно вмикати два амперметри з різними номінальними значеннями, але з різними внутрішніми опорами, так як сумарний струм не ділиться між ними порівно. Крім цього в той час коли амперметр з меншим опором R_A буде завантажений до межі, другий амперметр залишається недозавантаженим.

$$R_{A1} = 0,1\ Ом \qquad I_{A1} = 3,56\ A \qquad I_{н1} = 5\ A$$

$$R_{A2} = 0,08\ Ом \quad I_{A2} = 4,56\ A \qquad I_{н1} = 5\ A.$$

Додаток 4. Сторінки історії електротехніки

Коротка історія перших електричних досліджень

До XVIII ст. дослідження електричних явищ носило в основному епізодичний, часто випадковий характер. І лише починаючи з першої половини XVIII ст. широкого розповсюдження набули досліди, які базувалися на електризації, поляризації тіл та інших електричних явищах.

Англієць Стівен Грей (1670 – 1735) в 1729 р. показав, що електрика поширюється лише деякими тілами, ввівши таким чином поняття провідника та ізолятора. Він також відкрив і експериментально підтвердив явище електричної індукції.

В 1733 р. французький вчений Ш. Дюфе (1698 – 1739) відкрив два види електрики і показав, що всі тіла, крім металевих електризуються при терті. Широкого розповсюдження набули пристрої, в яких для електризації використовували тертя обертальних скляних куль, трубок, а пізніше дисків. Найпоширенішою з них була дискова машина Джессе Рамсдена (1735 – 1800) (рис. 60). В цей же період появились і перші електричні вимірювальні прилади – електрометри (рис. 58).

В середині XVIII ст. широкого розповсюдження набули досліди з електризацією, в тому числі людського тіла і можливістю зберігати електричний заряд. Найяскравіше ці можливості були реалізовані в так званій «лейденській банці» французьким фізиком Жаном Нолле (1700 – 1770) (рис. 59). В подальшому пляшка з водою була замінена банкою, яка з середини і ззовні обкладена металевою фольгою. Так був створений перший конденсатор.

Великий внесок в дослідження електричних явищ зробив визначний американський дослідник Бенджамін Франклін (1706 – 1790). Вже в перших своїх експериментах він зауважив подібність між електричною іскрою та

блискавкою. Франклін розпочав досліди з громовідводом, які були успішно продовжені в Європі. Так було започатковано дослідження атмосферної електрики. В 1747 – 52 рр. Франклін відкрив і доказав електричну природу блискавки, закон збереження заряду, винайшов громовідвід і плоский конденсатор.

Всередині XVIII ст. було запропоновано ряд теорій електрики, які об'єднувала одна риса: наявність деякого характерного флюїда, якому приписували різні властивості і пояснювали електричні явища механічними процесами. Однією з найвідоміших на той час була велика двотомна праця професора Турінського університету Джамбатіста Беккаріа (1716 – 1781) під назвою «Про електрику штучну і природню» (1753). В ній Беккаріа окрім інших важливих висновків показав, що немає чіткої межі між провідниками та ізоляторами, запровадивши таким чином поняття електричного опору. В цей же час Беккаріа висуває свою найважливішу гіпотезу про існування тісного взаємозв'язку між «циркуляцією» електричного флюїда і магнетизмом.

З 1756 р. ряд важливих відкриттів в електриці зробив німецький фізик Франц Епінус (1724 – 1802), який проживав в Петербурзі. Він запровадив повітряний конденсатор, замінивши скло в лейденській банці, відкрив піроелектрику в кристалі турмаліна – електризацію при нагріванні, поставив ряд важливих дослідів з електризації.

В другій половині XVIII ст. дослідів і гіпотез з електрики було вже стільки, що слід було від якісних досліджень переходити до кількісних, оперувати кількісними величинами, пов'язувати їх математичними співвідношеннями. Це в першу чергу вимагало чутливих приладів з точними шкалами. Розробку таких електроскопів розпочали Ф. Епінус, Генрі Кавендіш (1731 – 1810), Антоніо Далла Белла (1730 – 1823) та інші вчені. Ці пошуки довів до блискучого завершення французький військовий інженер Шарль Огюстен Кулон (1736 – 1806). На основі дослі-

джень пружного крутіння нитки він винайшов крутильну вагу (рис. 61) з допомогою якої з 1785 по 1789 рр. встановив основні закони електричної і магнітної взаємодії, заклавши фундамент сучасної електростатики.

Особливої уваги заслуговують досліди болонського професора Луіджі Гальвані (1737 – 1798), який фактично підсумував тодішні дослідженні про вплив електрики на живі організми. Його всесвітньовідомі досліди зі скороченням м'язів жаби під дією електрики переконливо показали, що «тваринна» електрика має ту ж природу, що й «машинна», зокрема м'язи і нерви за Гальвані утворюють ніби дві обкладинки конденсатора. Досліди Гальвані розширив і поглибив Алессандро Вольта (1745 – 1727). Спочатку він створював прицезійні електрофори та електроскопи (1763 – 1782) і фактично заклав основи електричної метрології. А в 90-х роках XVIII ст. Вольта завзято веде пошук контактної різниці потенціалів різних металів. Цей пошук закінчується геніальним винаходом електричної батареї (рис. 62), або «вольтового стовпа» (назва за формою перших зразків), який можна вважати певним підсумком електричних досліджень XVIII ст. і завершенням раннього етапу досліджень електричних явищ.

Хронологія електротехнічних відкриттів і винаходів людства

Біля 2700 р. до н. е.	Започатковано використання орієнтованості магнітної стрілки ***(Китай)***
VI ст. до н.е.	Зібрано перші відомості про електрику і магнетизм ***(Фалес Мілетський, Др. Грец.)***
1269 р.	Детально описано магнетизм, винайдено магнітний графометр ***(П. Перегріно, Іт.)***
1650 р.	Винайдено електростатичний генератор ***(О. фон Геріке, Німеччина)***
1706 р.	Створено першу електричну машину ***(Ф. Гауксбі, Великобританія)***
1710 р.	Відкрито свічення повітря при електророзряді ***(Ф. Гауксбі, Великобританія)***
1729 р.	Відкрито явище електропровідності ***(С. Грей, Великобританія)***
1737 р.	Винайдено прилад для вимірювання електрики ***(Ш. Дюфе, Франція)*** (рис.58)
1745 р.	Винайдено пристрій для створення електроенергії – перший конденсатор – лейденську банку ***(незалежно Е. Клейст, Померанія, П. ван Мушенбрук, Голан.)*** (рис.59) Винайдено "громову машину" – пристрій для утворення електричних зарядів ***(Г. Ріхман, Росія)***
1745 – 51 рр.	Винайдено "електричний гномоном" – один з перших електрометрів ***(М. Ломоносов, Росія)***

1747 – 52 рр. Доказано електричну природу блискавки, закон збереження заряду, винайдено громовідвід, плоский конденсатор ***(Б. Франклін, США)***

1753 р. Сконструйовано електроскоп, електрометр ***(Д. Каптон, Великобританія)***
Винайдено електростатичний телеграф ***(Великобританія)***

1756 р. Відкрито явище термо- і піроелектрики ***(Ф. Епінус, Німеччина)***

1759 р. Відкрито явища електростатичної індукції та поляризації діелектриків, винайдено електрофор ***(німець Ф. Епінус, Росія)***

1775 р. Винайдено електростатичну обертальну машину тертя – машину Рамсена ***(М. Планта, Д. Інгенгоус)*** (рис.60)

1785 р. Відкрито основний закон електровзаємодії ***(Ш. Кулон, Франція)*** (рис.61)

1799 р. Створено перше джерело електричного струму – електробатарею ***(А. Вольта, Італія)*** (рис.62)

1800 р. Відкрито явище електролізу ***(У. Нікомсон, А. Карлейль, Великобританія)***

1802 р. Відкрито електричну дугу, тліючі розряди, пробій діелектрика, електричне освітлення, високовольтну електробатарею, паралельне з'єднання в електричних колах ***(В. Петров, Росія)***
Відкрито елекрозаряджання мідних пластин в кислоті – принцип дії акумулятора ***(Й. Ріттер, Німеччина)***

1809 р. Винайдено електрохімічний телеграф ***(Земерінг, Німеччина)***

1818 р. Вперше використано атмосферну електрику ***(В. Каразін, Харківський ун-т)***

1820 р. Відкрито явище намагнічування провідників зі струмом, винайдено електромагніт ***(Д.Ф. Араго, Франція)*** (рис. 63)
Відкрито закон взаємодії струмів, соленоїд, пояснено магнетизм ***(А. Ампер, Франція)*** (рис. 65)
Винайдено гальванометр (гальваноскоп) ***(У. Швейгер, Німеччина)***
Відкрито магнітну дію електричного струму ***(Г. Ерстед, Данія)***

1821 р. Відкрито електромеханічну зміну енергії, створено модель двигуна постійного струму ***(М. Фарадей, Великобр.)*** (рис.64)
Відкрито явище термоелектрики, основу термометрії і термоелектрогенераторів ***(Т. Зеєбек, Німеччина)***

1823 р. Створено першу модель електродвигуна – колесо Барлоу ***(П. Барлоу, Вел.)*** (рис. 66)

1824 р. Винайдено вдосконалений електромагніт з металевим осердям ***(У. Стерджен, Вел.)***

1826 р. Відкрито основний закон електричного кола – закон Ома ***(Г. Ом, Німеччина)***

1829 – 32 рр. Розроблено і виготовлено електромагнітний телеграф ***(П. Шиллінг, Росія)***

1831 р. Відкрито явище електромагнітної індукції ***(незалежно М. Фарадей, Великобританія, Дж. Генрі, США)***, і на його основі

сконструйовано перший електрогененратор – "диск Фарадея" (рис.67)
Виготовлено перший електродвигун, електромеханічне реле ***(незалежно Дж. Генрі, США і С. Негро)*** (рис.68)

1832 р. Виготовлено генератор змінного струму, колектор ***(У. Піксії, Франція)***
Відкрито явище самоіндукції, винайдено електромагнітне реле ***(Дж. Генрі, США)***

1833 р. Винайдено аналоговий (стрілковий) амперметр ***(Нервандар)***
Встановлено напрям індукованих електрострумів і принцип оборотності електромагнітних процесів ***(Е. Ленц, Росія)***

1834 р. Винайдено електродвигун постійного струму з робочим валом ***(Б. Якобі, Росія)*** (рис.69)
Відкрито явище і закони електролізу ***(М. Фарадей, Великобританія)***

1837 – 39 рр. Відкрито звучаня котушки зі струмом, передано звуковий сигнал за допомогою електричного струму ***(Ч. Пейдж, США)***
Винайдено тангенціальний гальванометр – тангенс-бусоль ***(К. Пуйє, Франція)*** (рис. 70)

1841 р. Відкрито теплову дію електричного струму ***(Д. Джоуль, Великобританія)***
Винайдено синхронний електродвигун змінного струму ***(Ч. Уітстон, Великобр.)***

1844 р. Створено регульовану дугову електричну лампу ***(Л. Фуко, Франція)***

1845 р. Відкрито закони проходження електричного струму в розгалуженому колі ***(Г. Кірхгоф, Німеччина)***

1851 р. Винайдено індукційну котушку Румкорфа – праобраз трансформатора ***(Г. Румкорф, США)***

1854 р. Відкрито акумуляторний ефект на свинцевих пластинах в сірчаній кислоті **(*О. Зінстеден, Німеччина)***
Винайдено генератор із самозбудженням ***(Хіорт, Данія)***

1855 р. Розроблено спосіб зменшення індукційних струмів ***(Л. Фуко, Франція)***

1856 р. Винайдено оригінальний якір для електрогенератора ***(Ф. Сіменс, Німеч.)*** (рис. 71)
Винайдено газорозрядну лампу ***(Гейслер, Німеччина)***

1859 р. Винайдено свинцевий акумулятор ***(Г. Планте, Франція)***

1860 р. Винайдено динамомашину і електродвигун постійного струму з обертальним кільцевим якорем і колектором ***(А. Починотті, Італія)*** (рис. 72)

1860-65 рр. Створено теорію електромагнетизму, електромагнітну теорію світла ***(шотландець Дж. Максвелл, Великобританія)***

1866 р. Винайдено електрогенератор з електромагнітним збудженням ***(Вільд)***

1868 р. Винайдено сухий гальванічний елемент ***(Г. Лекланше, Франція)***

1869 р. Створено перший коливальний контур з індуктивностю і ємністю ***(Г. Гельмгольц, Німеччина)***

1870 р. Створено перший електричний генератор для практичного застосування ***(бельгієць З. Грамм, Франція)*** (рис.73)

Поч.70^{х} рр. XIX ст. Започатковано електроосвітлення ***(П. Яблочков, О. Лодигін, Росія)***

1872 р. Винайдено електричний лічильник ***(шотландець У. Томсон, Великобританія)***
Винайдено електричну лампу розжарення з роторновугільною спіраллю ***(А. Лодигін, Рос.)*** (рис.74)

1874 р. Вперше передано електроенергію на віддаль **(*українець Ф. Піроцький)***

1874 – 91 рр. Встановлено дискретність електрозаряду, запроваджено поняття електрона і розраховано його заряд ***(Дж. Стоней, Італія)***

1875 р. Доказано принцип оборотності електричних машин ***(І. Фонтель, Франція)***

1876 р. Винайдено трансформатор з розімкненою магнітосистемою, створено дугову лампу – "свічку Яблочкова" ***(П. Яблочков, Росія)*** (рис.76)

1878 р. Винайдено електродугову піч ***(Е. Сіменс, Німеччина)***

1879 р. Винайдено вакуумну лампу розжарення сучасного типу ***(Т. Едісон, США)*** (рис. 75)
Створено перший електровоз (шахтовий) ***(В.Сіменс, Німеччина)***

	Винайдено індукційний двигун з обертальними магнітними полюсами ***(Бейлі)***
1880 р.	Винайдено трамвай та електровоз ***(українець Ф. Піроцький)*** Розроблена теорія електропередач ***(Д. Лачинов, Росія)***
1881 р.	Винайдено схему розподілу і передачі електроренергії на далекі віддалі ***(М. Депре, Франція)*** Винайдено термоелектричний генератор ***(Л. Голар, Франція)***
1882 р.	Винайдено електрогефест – дугове електрозварювання ***(Н. Бенардос, Росія)*** Побудовано першу електростанцію ***(незалежно Т.Едісон, США і Росія)*** Винайдено електропраску ***(Х. Сілі, США)*** Створено першу лінію електропередач постійного струму (57 км) ***(М.Депре, Фран.)*** Винайдено багатообмотковий трансформатор ***(Л. Голар, Франція, В. Гіббс, США)*** (рис. 77)
Поч. 80^{х} рр. XIX ст.	Побудовано першу електростанцію змінного струму (Прага) і ряд електростанцій постійного струму, вдосконалено та детально досліджено катодні, неонові і розжарювальні лампи ***(українець І. Пулюй)***
1884 р.	Сконструйовано трансформатор із замкненою магнітною системою ***(брати Гопкінсон, Великобританія)***
1885 р.	Винайдено систему двофазного змінного струму ***(Г. Феррарiс, Італія)***

Виявлено вихрові електричні струми – струми Фуко **(*Л. Фуко, Франція)***

1886 р. Доказано випромінювання електромагнітних хвиль (радіохвиль), встановлено, що теплота і світло є електромагнітним випромінюванням ***(Г. Герц, Німеччина)***
Виготовлено перші напівпровідникові випрямлячі (селенові) ***(К. Фрітс)***

1887 р. Винайдено генератор і приймач електромагнітних хвиль (вібратор і резонатор Герца) ***(Г. Герц, Німеччина)***
Створено перше магнето ***(Б. Бош, Німеч.)***
Відкрито проходження електроструму через повітря ***(У. Боргман, Росія)***

1888 р. Винайдено генератор трифазного струму, схеми увімкнення електромашин "зіркою" і "трикутником" ***(М. Доливо-Добровольський з Одеси)*** (рис. 79)
Відкрито обертове магнітне поле – основу сучасних електродвигунів ***(хорват Н. Тесла, США, Г. Феррариc, Італія)***

1889 р. Вперше використано електромагнітні хвилі для передачі сигналів на віддалі ***(А. Попов, Росія)***
Винайдено трифазний асинхронний двигун ***(М. Доливо-Добровольський з Одеси)*** (рис.78*а*)

1890 р. Створено генератор змінного струму різних частот ***(хорват Н. Тесла, США)***
Винайдено трифазний трансформатор ***(М. Доливо-Добровольський з Одеси)*** (рис. 78*б*)

1891 р. Здійснено першу потужну електропередачу змінного струму Лауфен – Франкфурт (175 км) ***(М. Доливо-Добровольський з Одеси)***
Винайдено високочастотний трансформатор ***(хорват Н. Тесла, США)***

1892 р. Відкрито передачу електроенергії високочастотним струмом ***(хорват Н.Тесла, США)***

1892 – 1902 рр. Створено класичну електронну теорію та електродинаміку рухомих тіл ***(Х.Лоренц, Голандія)***

1893 р. Винайдено електромагнітний осцилограф ***(А. Блондель, Франція)***

1894 р. Винайдено фазометр ***(М. Доливо-Добровольський з Одеси)***

1895 р. Вперше застосовано електротягу на залізницях ***(США)***
Винайдено електронно-променеву осцилографічну трубку з вертикальним відхиленням променя ***(К.Браун, Німеччина)***

1897 р. Відкрито електрон ***(незалежно Дж. Томсон, Великобританія, Е. Віхерт, Німеччина)***
Винайдено безпровідникове телеграфування – радіотелеграф ***(Г. Марконі, Італія, А. Попов, Росія)*** (рис. 80, 81)
Відкрито безпровідникове радіокерування ***(українець М. Пильчиков)***

1898 р. Створено дугові електропечі для виплавляння сталі ***(Е. Стасанно, Італія, П. Еру, Франція)***

Побудовано акумуляторний електровоз ***(США)***

1903 р. Винайдено лужний акумулятор ***(Т. Едісон, США)***

1904 р. Винайдено двоелектродну електронну лампу – діод ***(Дж. Флемінг, Велик.)*** (рис.82)

1910 р. Винайдено газорозрядний тріод з перфорованою сіткою ***(Р. фон Лібен, Німеччина)*** (рис. 83)

1911 р. Вперше точно виміряно заряд електрона ***(Р. Мілікен, США)***
Спроектовано електронну телевізійну систему ***(А. Суінтон, Великобританія)***

1913 р. Встановлено наявність вільних електронів в металах ***(Л. Мандельштам, М. Папалексі, Росія)***

1924 р. Виготовлено перший напівпровідниковий випрямляч ***(Ф. Гейгер)***
Винайдено магнетронний генератор ***(А. Слуцкін, Д. Штейнберг, УРСР)***

1928 р. Винайдено електробритву ***(Д. Шик, США)***

1929 р. Винайдено напівпровідниковий термоелектричний генератор ***(А. Йоффе, СРСР)***

1930 р. Запроваджено високочастотне електронагрівання ***(Н. Селюгін, А. Йоффе, СРСР)***

1935 р. Розроблено електропривід з тератроном ***(А. Іосіф'ян, СРСР)***

Винайдено метод ідукційного поверхневого загартування металів струмами високої частоти ***(В. Вологдін, СРСР)***

1936 р. Спроектовано першу високопродуктивну вітроелектростанцію ***(Ю. Кондратюк, УРСР)***

1954 р. Споруджено першу атомну електростанцію ***(І. Курчатов, Д. Блохінцев, А. Красін та ін., СРСР, м. Обнінск)*** (рис.84)

1964 р. Створено перший ядерний реактор з безпосереднім перетворенням ядерної енергії в електричну ***(М. Міліонщиков та ін., СРСР)***

1999 – 2001 р. Винайдено електромагнітний двигун, який живиться від магнітного поля Землі ***(Р. Бахман, О. Ланюк, Рос.)***

Ілюстрації електротехнічних винаходів

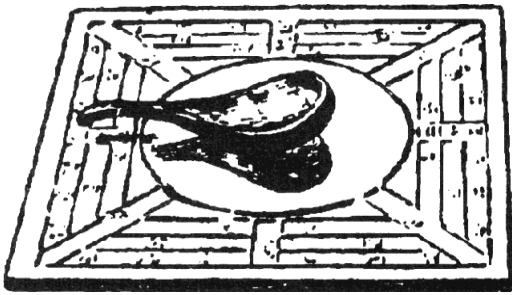


Рис. 57. Стародавній компас *(Китай, III тис. до н.е.)*

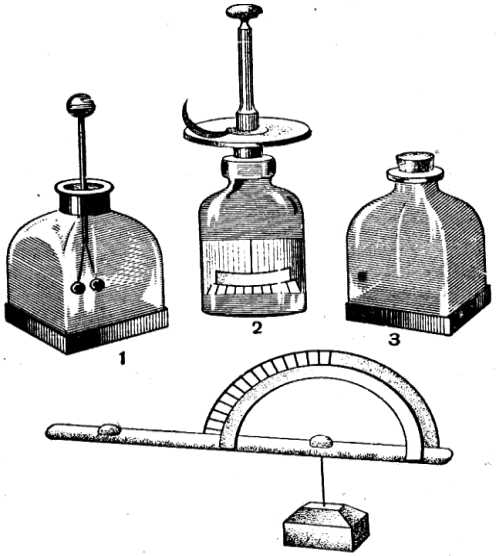


Рис. 58. Одні з перших електрометрів *(XVIII ст.)*

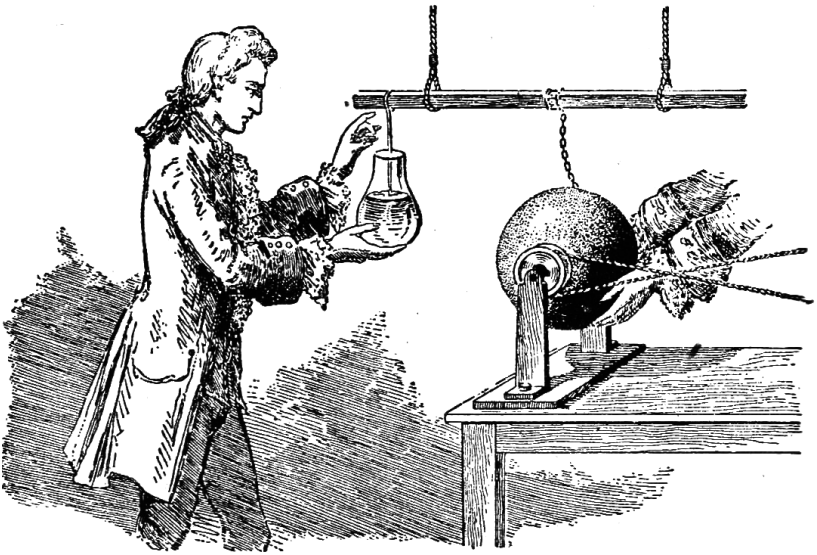


Рис. 59. Лейденський дослід *(сер. XVIII ст.)*

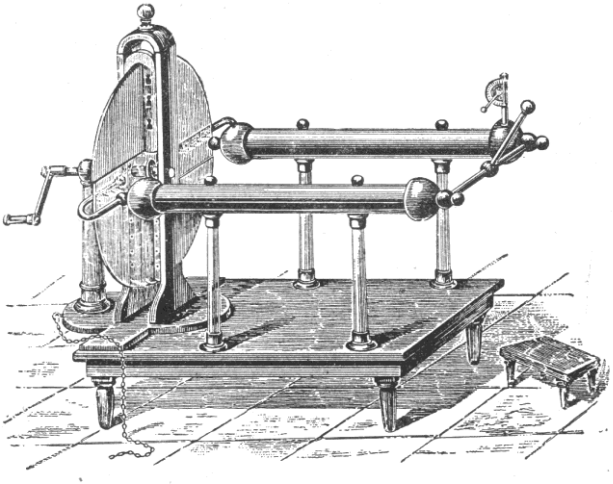


Рис. 60. Електрична обертальна машина *(кін. XVIII ст.)*

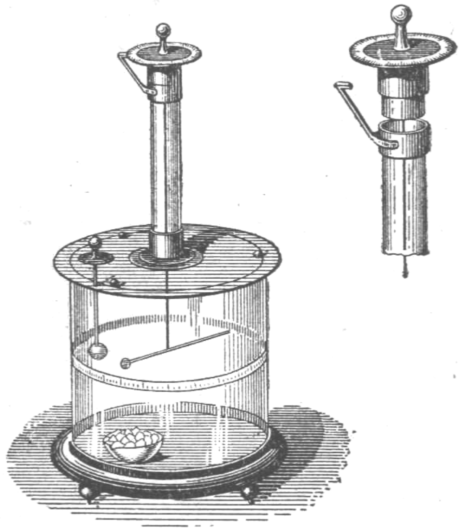


Рис. 61. Крутильна вага Ш. Кулона для визначення електровзаємодії *(Франція, 1785)*

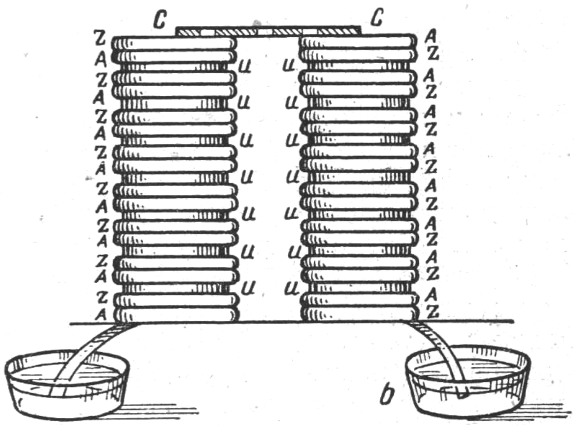


Рис. 62. Електрична батарея А. Вольта *(Італія, 1799)*

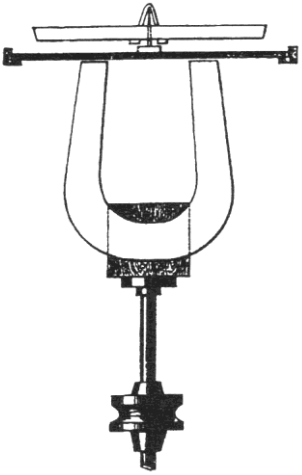


Рис. 63. Намагнічувальне кільце Д. Араго *(Фр., 1820)*

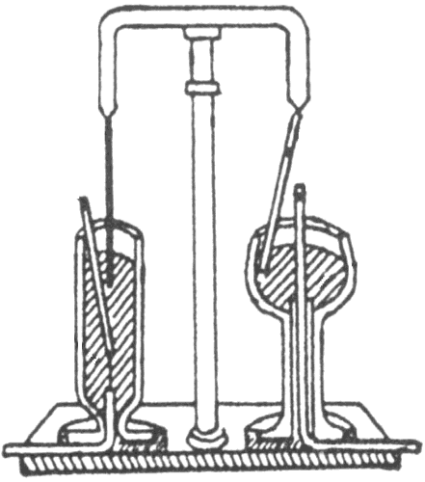


Рис. 64. Модель двигуна М. Фарадея *(Вел., 1821)*

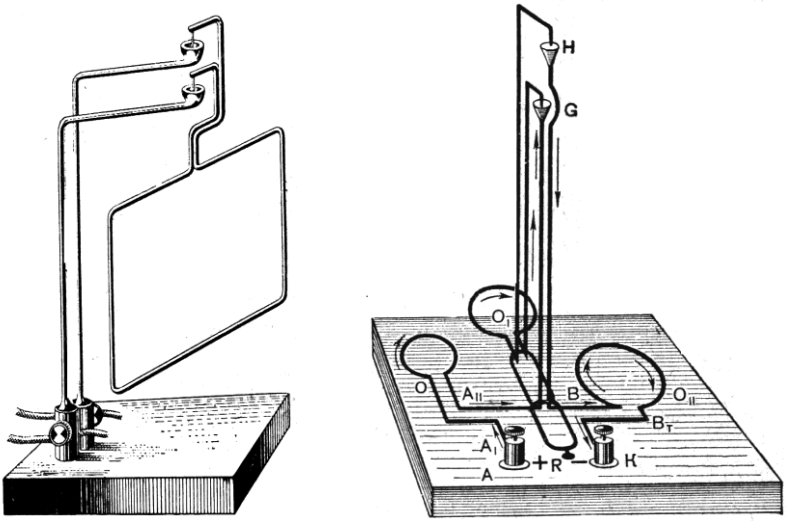


Рис. 65. Пристрій і схема досліду А. Ампера *(Франція, 1820)*

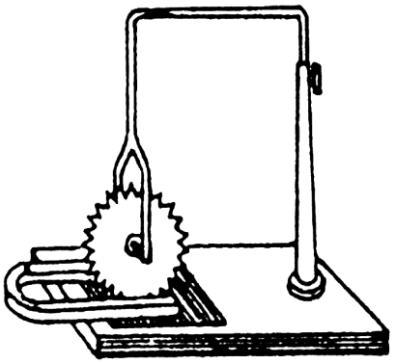


Рис. 66. Модель електродвигуна – колесо П. Барлоу *(Великобританія, 1820)*

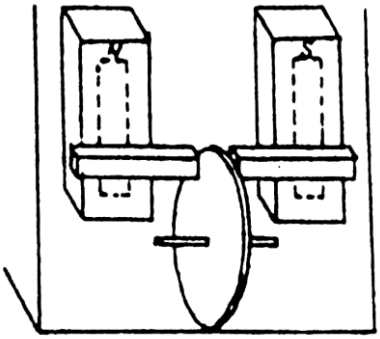


Рис. 67. Перший електрогенератор – диск Фарадея *(Великобританія, 1831)*

Рис. 68. Електричний двигун Дж. Генрі *(США, 1831)*

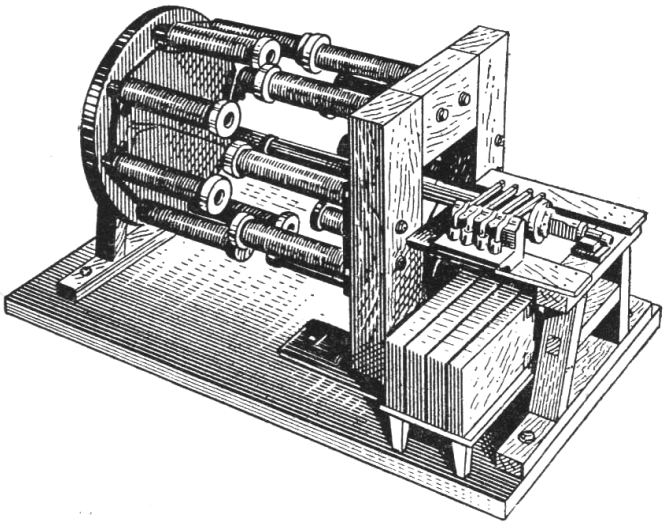


Рис. 69. Модель електродвигуна Б. Якобі *(Росія, 1834)*

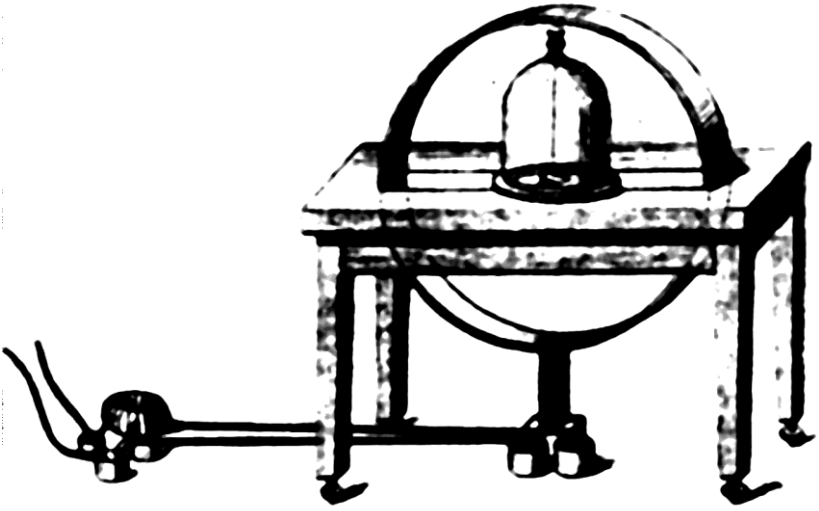


Рис. 70. Тангенс-бусоль (гальванометр) К. Пуйє *(Фр., 1839)*

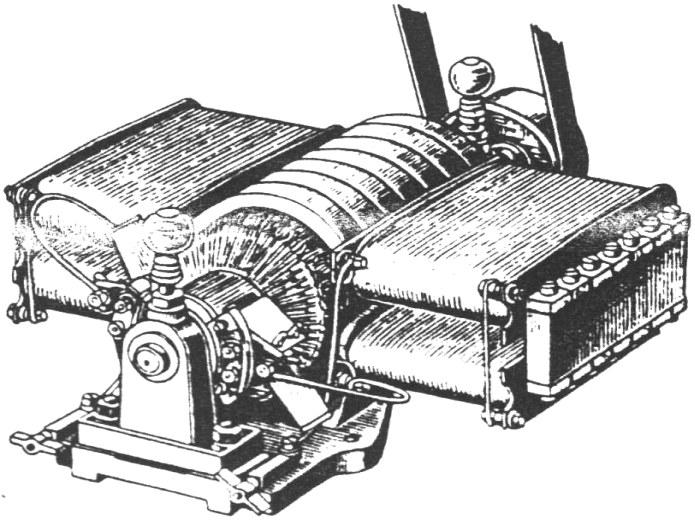


Рис. 71. Динамомашина з якорем Ф. Сіменса *(Нім., 1856)*

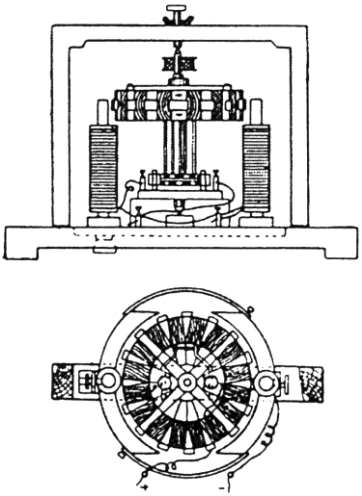


Рис. 72. Електродвигун А. Починотті *(Італія, 1860)*

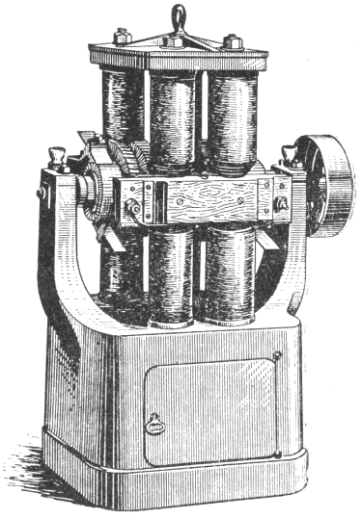


Рис. 73. Електрогенератор З. Грамма *(Франція, 1870)*

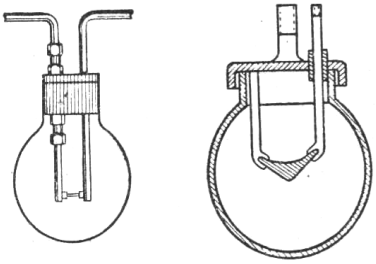


Рис. 74. Схема електролампи розжарення А. Лодигіна *(Росія, 1872)*

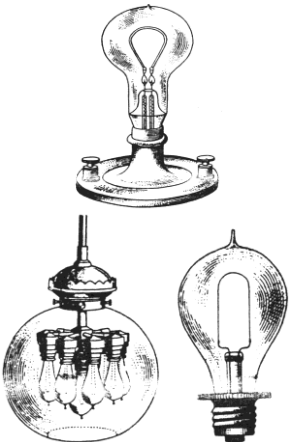


Рис. 75. Електролампи Т. Едісона *(США, 1879-84)*

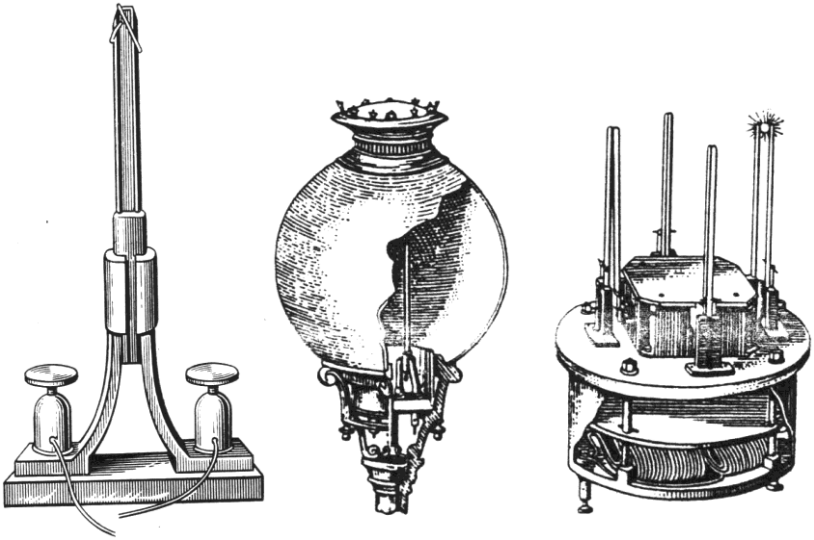


Рис. 76. Електродугові лампи – «свічки Яблочкова» *(Росія, 1876)*

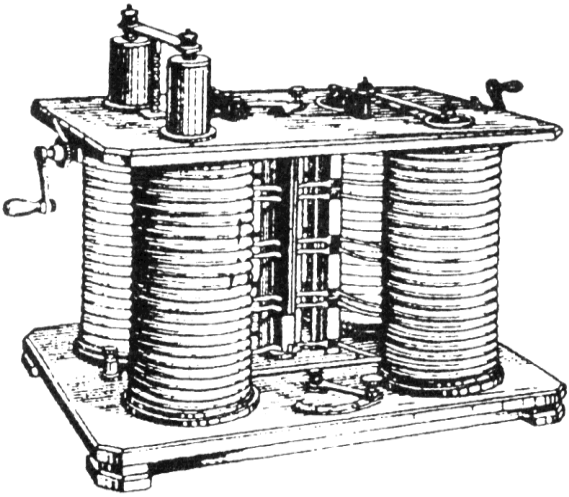
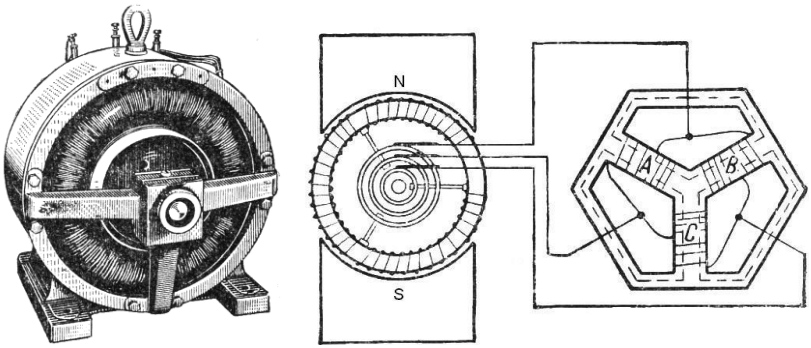


Рис. 77. Багатообмотковий трансформатор Л. Голара та Дж.В. Гіббса *(США, 1885)*



а *б*

Рис. 78. Трифазний асинхронний двигун (*а*) і схема трифазного трансформатора (*б*) М. Доливо-Добровольського *(1890)*

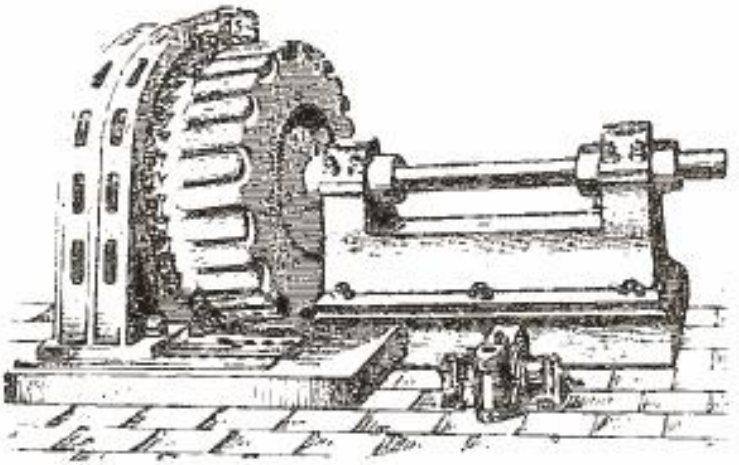


Рис. 79. Генератор трифазного струму М. Доливо-Добровольського *(90 і рр. XIX ст.)*

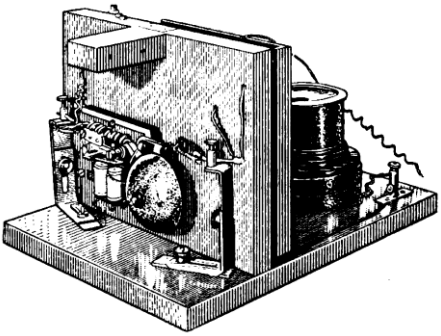


Рис. 80. Радіоприймач А. Попова *(Росія, 1895)*

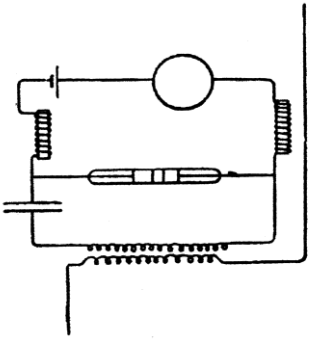


Рис. 81. Схема радіоприймача Г.М. Марконі *(Італія, 1898)*

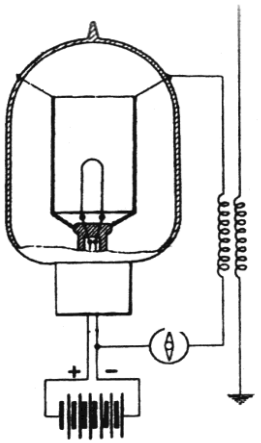


Рис. 82. Конструкція двоелектронної лампи Дж. Флемінга *(Великобританія, 1904)*

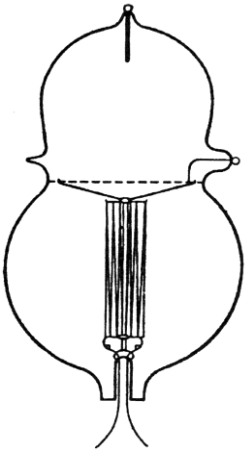


Рис. 83. Схема газорозрядного тріоду Р. фон Лібена *(Німеччина, 1910)*

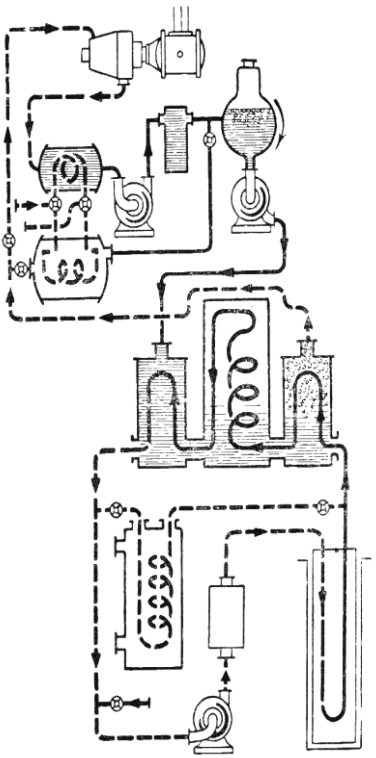


Рис. 84. Принципова схема першої атомної електростанції *(СРСР, м. Обнінськ, 1954)*

Список літератури

1. Бобало Ю.Я., Мандзій Б.А., Стахів П.Г. та ін. Основи теорії електронних кіл.. – Львів: В-во НУ „Львівська політехніка”, 2008. – 330 с.
2. Коруд В.І., Гамола О.Є., Малинівський С.М. Електротехніка. – Львів: «Магнолія 2006», 2007. – 446 с.
3. Малинівський С.М. Загальна електротехніка. – Львів: В-во НУ „Львівська політехніка”, 2003. – 596 с.
4. Титаренко М.В. Електротехніка К.: Кандор, 2004. – 240 с.
5. Паначевний Б.І., Свергун Ю.Ф. Загальна електротехніка. – К.: Каравела, 2003. – 438с.
6. Вартабелян В.А. Загальна електротехніка. – К.: Вища школа, 1993. – 182 с.
7. Волынский Б.А., Зейн Е.Н., Шатерников В.Е. Электротехника. – М.: Элетроатомиздат, 1987. – 526 с.
8. Кутунович Ф.Г. Электротехника. – М.: Высшая школа, 1999. – 400 с.
9. Касаткин А.С., Немцов М.В. Электротехника. – М.: Высшая школа, 2000. – 542 с.
10. Збірник задач з теоретичної електротехніки / за ред. А.Ю. Воробкевича, О.І.Шегедина. – Львів: Магнолія, 2004. – 224с.
11. Березкина Т.Ф., Гусев Н.Г., Масленников В.В. Задачник по общей электротехнике с основами электроники. – М.: Высшая школа, 1991. – 384 с.
12. Ціж Б. Електротехніка. – Львів: В-во ЛНУВМ та БТ ім. С.З. Гжицького, 2008. – 110 с.
13. Методичні настанови та інструкції до лабораторних робіт з загальної електротехніки. – Львів: В-во НУ „Львівська політехніка”, 1998. – 38 с.
14. Методичні настанови до виконання лабораторного практикуму з електротехніки. – Львів: ЛНАВМ ім. С.З. Гжицького, 2005. – 34 с.
15. Ціж Б. Хронологія технічного прогресу. – Львів: Ліга-Прес, 2003. – 182 с.

ЗМІСТ

Вступ..... 3

Частина І. Електротехнічний практикум … 5
Розділ 1. Основні поняття електротехніки …… 5
Основні теоретичні відомості…….. 5
Приклади розв'язування задач……..... 8
Задачі для самостійного розв'язування……..... 10
Запитання для самоперевірки…….. 15

Розділ 2. Електричні кола постійного струму …. 16
Основні теоретичні відомості…….. 16
Приклади розв'язування задач……..... 20
Задачі для самостійного розв'язування……..... 24
Запитання для самоперевірки…….. 33

Розділ 3. Електричні кола синусоїдного струму.. 34
Основні теоретичні відомості…….. 34
Приклади розв'язування задач……..... 43
Задачі для самостійного розв'язування……..... 61
Запитання для самоперевірки…….. 74

Розділ 4. Трифазні електричні кола …… 76
Основні теоретичні відомості…….. 76
Приклади розв'язування задач……..... 80
Задачі для самостійного розв'язування……..... 84
Запитання для самоперевірки…….. 90

Розділ 5. Траснсформатори…….. 91
Основні теоретичні відомості…….. 91
Приклади розв'язування задач……..... 95
Задачі для самостійного розв'язування……..... 96
Запитання для самоперевірки…….. 98

Розділ 6. Електричні машини постійного струму…….. 99
Основні теоретичні відомості…….. 99
Приклади розв'язування задач……..... 104
Задачі для самостійного розв'язування……..... 108
Запитання для самоперевірки…….. 112

Розділ 7. Електричні машини змінного струму. Асинхронні двигуни …….. 113
Основні теоретичні відомості…….. 113
Приклади розв'язування задач……..... 119
Задачі для самостійного розв'язування……..... 121
Запитання для самоперевірки…….. 124

Частина ІІ. Лабораторний практикум ….. 126
Розділ 1. Чисельний експеримент …….. 126
Розрахункова робота № 1. Розрахунок послідовного з'єднання резистора та котушки індуктивності... 126
Розрахункова робота № 2. Розрахунок послідовного з'єднання резистора та конденсатора без втрат…... 127
Розрахункова робота № 3. Розрахунок послідовного з'єднання резистора, котушки індуктивності..…….. 129
Розрахункова робота № 4. Розрахунок паралельного з'єднання резистора, конденсатора та котушки індуктивності……... 131
Розрахункова робота № 5. Розрахунок робочих характеристик електричних машин ……...…….. 134

Розділ 2. Фізичний експеримент……... 138
Лабораторна робота № 1. Вивчення рівнянь Кірхгофа в електричному колі постійного струму …… 138
Лабораторна робота № 2. Дослідження кола змінного струму при послідовному сполученні резистора та конденсатора...…… 140
Лабораторна робота № 3. Дослідження кола змінного струму при послідовному сполученні резистора та котушки індуктивності...…… 144

Лабораторна робота № 4. Дослідження кола змінного струму при послідовному з'єднані резистора, конденсатора та котушки індуктивності…...… 147
Лабораторна робота № 5. Дослідження кола змінного струму при послідовному з'єднані резистора, конденсатора та котушки індуктивності…...… 150
Лабораторна робота № 6. З'єднання зіркою трифазного електричного кола …… 153
Лабораторна робота № 7. З'єднання трикутником трифазного електричного кола……. 156
Лабораторна робота № 8. Ознайомлення з будовою та дослідження основних характеристик силового трансформатора……... 159
Лабораторна робота № 9. Ознайомлення з будовою та основними характеристиками асинхронного двигуна з фазним ротором ……... 163
Лабораторна робота № 10. Ознайомлення з будовою та основними характеристиками генератора постійного струму……. 168
Лабораторна робота № 11. Ознайомлення з будовою та основними характеристиками шунтового двигуна постійного струму …….. 173

Розділ 3. Основи електробезпеки та правила техніки безпеки……... 177

3.1. Основи електробезпеки……... 177
3.1.1. Дія електричного струму на організм людини…… 177
3.1.2. Фактори, які визначають ураження електричним струмом…….. 180
3.1.3. Допустиме значення струму через людину…… 182

3.2. Загальні вимоги правил техніки безпеки……. 183
3.3. Спеціальні вимоги правил техніки безпеки…… 184
3.3.1. Заходи безпеки перед початком роботи.... 184

3.3.2. Заходи безпеки під час виконання роботи.. 185
3.3.3. Заходи безпеки після закінчення роботи… 186
3.4. Протипожежна безпека……... 186
3.5. Заходи долікарської допомоги під час нещасних випадків……. 187
3.5.1. Звільнення від електричного струму ……. 187
3.5.2. Заходи першої допомоги потерпілому від електричного струму…….. 188
3.5.3. Основні правила проведення штучного дихання та масажу серця…… 189

Додатки……... 192
Додаток 1. Допоміжні таблиці …… 192
Додаток 2. Приклади розв'язування типових рівнянь та зображення електричних величин……... 194
Додаток 3. Електровимірювальні прилади …….. 203
Додаток 4. Сторінки історії електротехніки…….. 214

Список літератури…… 239

Зміст……. 240

Навчальне видання

ЦІЖ Богдан Романович
МАКСИСЬКО Оксана Романівна
ГАЛКІНА Надія Сергіївна

ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

Навчально-методичний посібник

Комп'ютерна верстка: *Ярослав Магола*

Підписано до друку 28.02.2019 р. Формат 60×84 $^{1}/_{16}$.
Папір офсетний. Тираж 100 прим.

79010, м. Львів, вул. Пекарська, 50.

Тел.: (032)239-26-35