

Міністерство освіти і науки України

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

Факультет харчових технологій та біотехнології

Кафедра загальнотехнічних дисциплін

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт
з навчальної дисципліни

«Електротехніка з основами електроніки»

Розробили: професор Ціж Б. Р.
 доцента Максисько О. Р.

Львів 2020

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, простою керування, високим ккд тощо. В зв'язку з цим електротехнічні пристрої необхідні в сучасному виробництві і технологіях, зокрема харчових галузей.

В даних методичних вказівках представлені 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 та основи електромеханіки».

В настановах до кожної лабораторної роботи подано у стислій формі теоретичні пояснення та необхідні для обчислення формули. Важливим є те, що кожній лабораторній роботі передують числовий експеримент, тобто розв'язок задачі за темою, що суттєво підвищує вагу експерименту. Для кращого засвоєння матеріалу дисципліни, в кінці 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 відкриттів і винаходів людства, нарис про перші електричні дослідження та ілюстрації найважливіших електротехнічних винаходів.

Розділ 1. Чисельний експеримент

Розрахункова робота № 1

Розрахунок послідовного з'єднання резистора та котушки індуктивності

Коло (рис. 1) містить послідовно з'єднані резистор $R = 30 \text{ Ом}$ та ідеальну котушку, індуктивність якої $L = 63,7 \text{ мГн}$. До зати-скачів кола підведена напруга $U = 220 \text{ В}$, з частотою $f = 100 \text{ Гц}$.

Визначити реактивний X_L та повний Z опори кола, струм (показ амперметра), напруги на елементах U_R , U_L , активну P , реак-тивну Q та повну S потужності, а також коефіцієнт потужності $\cos \varphi$ та кут φ . Побудувати векторну діаграму напруг.

Ціна поділки амперметра рівна $C_a = I_{\text{ном.}} / n$, де $I_{\text{ном.}}$ – номіналь-ний 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: $I = \frac{U}{Z} = \frac{220}{50} = 4,4 \text{ А.}$

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 підведених: $U = \sqrt{U_R^2 + U_L^2} = \sqrt{132^2 + 156^2} = 220 \text{ В.}$

Активна потужність: $P = U_R I = 132 \cdot 4,4 \cong 580 \text{ Вт.}$

Реактивна потужність: $Q = U_L I = 156 \cdot 4,4 = 686 \text{ ВАр.}$

Повна потужність: $S = UI = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{580^2 + 686^2} = 968 \text{ ВА.}$

Коефіцієнт потужності: $\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{580}{968} = 0,6$.

Кут зсуву фаз між напругою та струмом: $\varphi = \arctg \varphi \cong 53^\circ$.

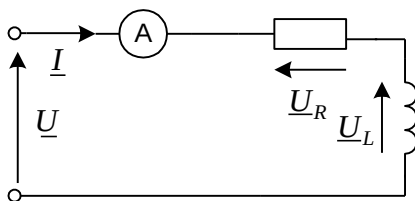


Рис. 1

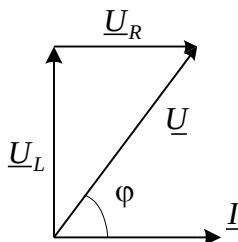


Рис. 2

Векторна діаграма показана на рис. 2.

Примітка. Амперметр має границю вимірювання 5 A та 150 поділок, тобто ціна поділки $C_\alpha = \frac{I_{ном}}{n} = \frac{5}{150} = 0,033\text{ A/под.}$

Розрахункова робота № 2

Розрахунок послідовного з'єднання резистора та конденсатора без втрат

В колі показаному на рис. 1 показання амперметра, що вимірює діюче значення, складає $n = 30$ поділок, при цьому амперметр має межу вимірювань 5 A , та уся шкала приладу містить 50 поділок. Відомо, що $R = 40\text{ Ом}$, $C = 11,1 \cdot 10^{-5}\text{ Ф}$. Частота живлення $f = 50\text{ Гц}$. 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:

$$X_c = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2 \cdot 3.14 \cdot 50 \cdot 11.1 \cdot 10^{-5}} = 30 \text{ Ом.}$$

Повний опір: $Z = \sqrt{R^2 + X_c^2} = \sqrt{40^2 + 30^2} = 50 \text{ Ом.}$

За показаннями амперметра визначаємо струм:

$$I = n \cdot C_a = 30 \cdot \frac{5}{50} = 3 \text{ А.}$$

Обчислюємо напруги: $U_R = R \cdot I = 40 \cdot 3 = 120 \text{ В,}$

$U_C = X_c \cdot I = 30 \cdot 3 = 90 \text{ В, } U = Z \cdot I = 50 \cdot 3 = 150 \text{ В.}$

Таким чином показання вольтметра V_1 дорівнюють 120 В , V_2 відповідно 90 В і V_0 відповідно 150 В .

Активна потужність: $P = U_R \cdot I = R \cdot I^2 = 40 \cdot 3^2 = 360 \text{ Вт.}$ Реактивна потужність $Q = U_C \cdot I = X_c \cdot I^2 = 30 \cdot 3^2 = 270 \text{ ВАр.}$

Повна потужність $S = U \cdot I = Z \cdot I^2 = 50 \cdot 3^2 = 450 \text{ ВА.}$

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{360}{450} = 0,8; \quad \varphi = \arccos \varphi \cong 37^\circ.$$

Векторна діаграма показана на рис. 2.

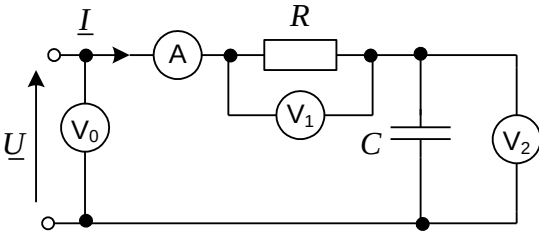


Рис. 1

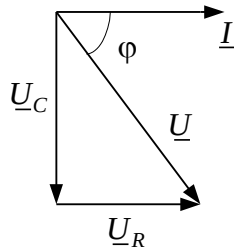


Рис.2

Розрахункова робота № 3

Розрахунок послідовного з'єднання резистора, конденсатора, котушки індуктивності

В колі зображеному на рис. 1 відомо що $L = 0,2 \text{ Гн}$, $C = 31,4 \text{ мкФ}$, $R = 60 \text{ Ом}$. Діюче значення підведеної напруги $U = 36 \text{ В}$, частота живлення $f = 50 \text{ Гц}$.

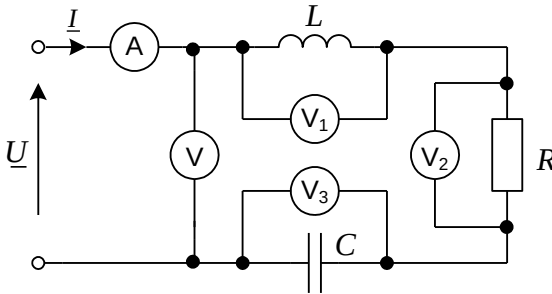


Рис. 1

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 $\cos \varphi$ та кут φ . Побудувати векторні діаграми напруг, трикутники опорів та потужностей.

Проведення розрахунків

Визначаємо опори кола.

Реактивний ємнісний:

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 31,4 \cdot 10^{-6}} = 101,4 \text{ Ом.}$$

Реактивний індуктивний:

$$X_L = 2\pi fL = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 0,2 = 62,8 \text{ Ом.}$$

Загальний реактивний:

$$X = X_L - X_C = 62,8 - 101,4 = -38,6 \text{ Ом.}$$

Зауважимо, що загальний реактивний опір в цій задачі є від'ємний, тобто коло носить ємнісний характер.

Повний опір кола $Z = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{60^2 + (-38,6)^2} \cong 71 \text{ Ом}$.

Коефіцієнт потужності $\cos \varphi = \frac{R}{Z} = \frac{60}{71} = 0,857$,

а кут $\varphi = \arctg \frac{-X}{R} = -59^\circ$, кут від'ємний оскільки $X < 0$.

Діюче значення струму $I = \frac{U}{Z} = \frac{36}{71} = 0,507 \text{ А}$.

$$U_L = X_L \cdot I = 62,8 \cdot 0,507 = 31,84 \text{ В}.$$

$$U_R = R \cdot I = 60 \cdot 0,507 = 30,42 \text{ В}.$$

$$U_C = X_C \cdot I = 101,4 \cdot 0,507 = 51,41 \text{ В}.$$

Покази приладів: амперметр A : $I = 0,507 \text{ А}$, вольтметр V_1 : $U_1 = 31,84 \text{ В}$, вольтметр V_2 : $U_2 = 30,42 \text{ В}$, вольтметр V_3 : $U_3 = 51,41 \text{ В}$, вольтметр $V - 36 \text{ В}$, відповідно.

Також зауважимо, що напруга на реактивному елементі (в нашому випадку конденсаторі) перевищує підведену, таке явище дістало назву амплітудного резонансу.

Обчислюємо потужності.

Активна: $P = R \cdot I^2 = 60 \cdot (0,507)^2 = 15,42 \text{ Вт}$.

Реактивна: $Q = X \cdot I^2 = -38,6 \cdot (0,507)^2 = -9,92 \text{ ВАр}$.

Повна: $S = Z \cdot I^2 = 71 \cdot (0,507)^2 = 18,25 \text{ ВА}$.

Векторна діаграма напруг та трикутник опорів наведені на рис. 2.

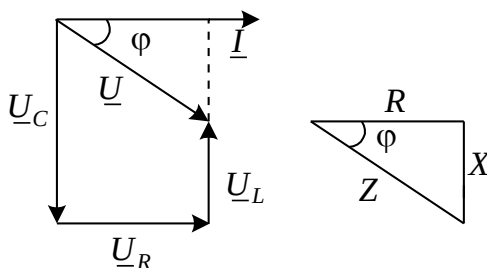


Рис. 2

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. 1), під'єднаний паралельно конденсатор C , опір якого $X_C = 133,3$ Ом (рис. 2). Надалі до цих елементів паралельно під'єднана котушка L , опір якої $X_L = 66,65$ Ом (рис. 3).

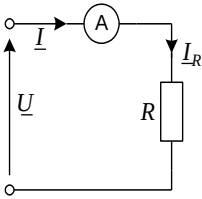


Рис. 1

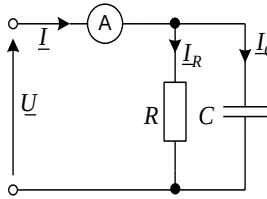


Рис. 2

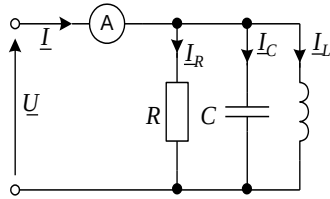


Рис. 3

Для усіх трьох випадків обчислити вхідну провідність $Y_{\text{вх.}}$ та коефіцієнт потужності $\cos \varphi_{\text{вх.}}$; 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. 1.

Вхідна провідність:

$$Y = \sqrt{G^2 + B^2} = \frac{I}{U} = \frac{1}{R} = G = \frac{0,4}{40} = 0,01 \text{ Ом}^{-1}.$$

Коефіцієнт потужності $\cos \varphi_{\text{вх.}} = \frac{G}{Y} = 1$, струм на вході кола

$I = 0,4$ А.

Активна потужність

$$P = R \cdot I^2 = G \cdot U^2 = 0,01 \cdot 40^2 = 16 \text{ Вт}.$$

Реактивна потужність $Q = X \cdot I^2 = B \cdot U^2 = 0 \text{ ВАр}$, бо $B = 0$.

Повна потужність $S = U \cdot I = 40 \cdot 0,4 = 16 \text{ ВА}$.

Векторна діаграма зображена на рис. 4.

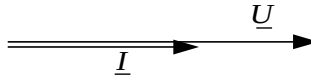


Рис. 4

Оскільки реактивна провідність, відповідно і реактивна потужність дорівнюють нулеві, то відповідні трикутники провідностей та потужностей перетворюються в прямолінійні відрізки.

Для схеми на рис.2.

$$\begin{aligned} \text{Вхідна провідність: } Y_{ex.} &= \sqrt{G^2 + B_C^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{R}\right)^2 + \left(\frac{1}{X_C}\right)^2} = \\ &= \sqrt{(0,01)^2 + \left(\frac{1}{133,3}\right)^2} = 0,0125 \text{ Ом}^{-1}. \end{aligned}$$

$$\text{Коефіцієнт потужності } \cos \varphi_{ex.} = \frac{G}{Y} = \frac{0,01}{0,0125} = 0,8.$$

$$\text{Струм конденсатора } I = B_C \cdot U = \frac{1}{133,3} \cdot 40 = 0,3 \text{ A.}$$

$$\text{Струм на вході кола } I = Y_{ex.} \cdot U = 0,0125 \cdot 40 = 0,5 \text{ A.}$$

$$\text{Активна потужність } P = G \cdot U^2 = 0,01 \cdot 40^2 = 16 \text{ Вт.}$$

$$\text{Реактивна потужність } Q = B \cdot U^2 = \frac{1}{133,3} \cdot 40^2 = 12 \text{ Вар.}$$

$$\begin{aligned} \text{Повна потужність } S &= U \cdot I = \sqrt{P^2 + Q^2} = 40 \cdot 0,5 = \\ &= 20 \text{ ВА} = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{16^2 + 12^2} = 20 \text{ ВА.} \end{aligned}$$

Векторна діаграма струмів показана на рис. 5, трикутники провідностей та потужностей показано на рис. 6 та 7 відповідно.

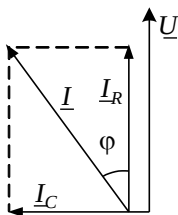


Рис. 5

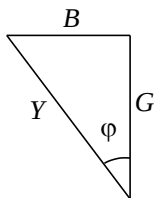


Рис. 6

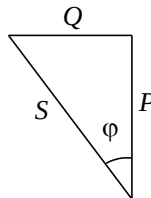


Рис. 7

Для схеми на рисунок 3.

Вхідна провідність:

$$Y_{\text{ex.}} = \sqrt{G^2 + (B_L - B_C)^2} = \sqrt{(0,01)^2 + \left(\frac{1}{66,65} - \frac{1}{133,3}\right)^2} = 0,0125 \text{ Ом}^{-1}.$$

Коефіцієнт потужності: $\cos \varphi_{\text{ex.}} = \frac{G}{Y} = \frac{0,01}{0,0125} = 0,8.$

Струм котушки: $I_L = B_L \cdot U = \frac{1}{66,65} \cdot 40 = 0,6 \text{ А}.$

Струм на вході кола: $I = Y_{\text{ex.}} \cdot U = 0,0125 \cdot 40 = 0,5 \text{ А}.$

Активна потужність: $P = G \cdot U^2 = 16 \text{ Вт}.$

Реактивна потужність:

$$Q = (B_L - B_C) \cdot U^2 = 0,075 \cdot 40^2 = 12 \text{ ВАр}.$$

Повна потужність:

$$S = U \cdot I = 40 \cdot 0,5 = 20 \text{ ВА}.$$

Векторна діаграма струмів показана на рис. 8, трикутники провідності та потужності показано на рис. 9 та 10 відповідно.

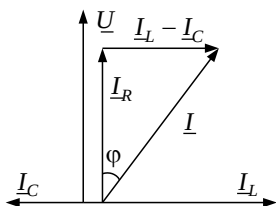


Рис. 8

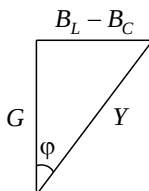


Рис. 9

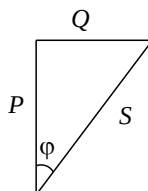


Рис. 10

Розрахункова робота № 5

Розрахунок робочих характеристик електричних машин

1. Генератор постійного струму незалежного збудження (рис. 1) має наступні номінальні дані: потужність $P_{ном} = 11,5 \text{ кВт}$, напругу $U_{ном} = 230 \text{ В}$. Опір кола якоря $R_{я} = 0,18 \text{ Ом}$. Визначити ЕРС генератора $E_{я}$, та напругу U на його затискачах, якщо навантаження генератора зменшиться у два рази.

Проведення розрахунків

Визначаємо номінальний струм генератора: $I_{ном} = P_{ном} / U_{ном} = 11500 / 230 = 50 \text{ А}$.

ЕРС генератора визначається за формулою: $E_{я} = U + R_{я} I_{я} = 230 + 0,18 \cdot 50 = 239 \text{ В}$.

Зауважимо, що у генератора незалежного збудження $I_{Г} = I_{я}$.

При зменшенні навантаження вдвічі $I_{я} = 0,5 I_{ном} = 0,5 \cdot 50 = 25 \text{ А}$. Напруга на затискачах генератора при цьому буде :

$$U_{Г} = E - R_{я} I_{я} = 239 - 0,18 \cdot 25 = 234,5 \text{ В}.$$

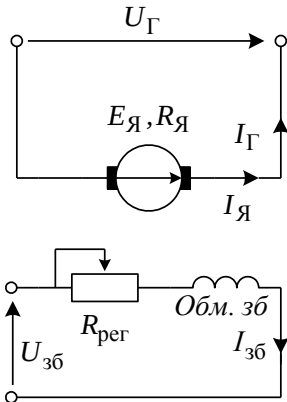


Рис. 1

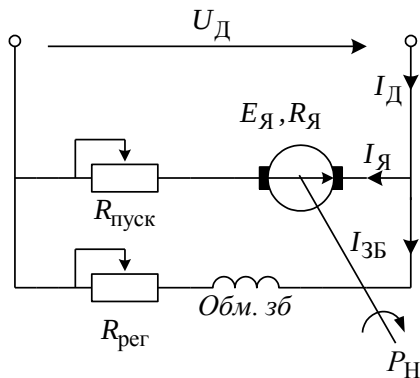


Рис. 2

2. Двигун постійного струму паралельного збудження (рис. 2), має наступні номінальні дані: $P_{Н} = 9,375 \text{ кВт}$, $U_{Н} = 250 \text{ В}$, коефіцієнт корисної дії $\eta = 0,75$, частоту обертання $n_{Н} = 975 \text{ об/хв}$. Опір

кола якоря $R_{\text{я}} = 0,25 \text{ Ом}$. Розрахувати споживану двигуном потужність $P_{\text{н}}$, номінальний обертовий момент $M_{\text{н}}$ та величину опору пускового реостату, при якому пусковий струм якоря $I_{\text{яп}}$ не буде втричі перевищувати його номінальний струм, тобто $I_{\text{яп}} \leq 3 I_{\text{ян}}$.

Проведення розрахунків

Визначаємо потужність, споживану двигуном:

$$P_{\text{д}} = \frac{P_{\text{н}}}{\eta_{\text{н}}} = \frac{9,375}{0,75} = 12,5 \text{ кВт}.$$

Визначаємо номінальний обертовий момент:

$$M_{\text{об}} = \frac{9,55 P_{\text{н}}}{n_{\text{н}}} = \frac{9,55 \cdot 9,375}{975} = 91,8 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Визначаємо номінальний струм двигуна $I_{\text{д}}$:

$$I_{\text{д}} = \frac{P_{\text{д}}}{U_{\text{н}}} = \frac{12500}{250} = 50 \text{ А}.$$

Розрахуємо опір пускового реостату нехтуючи струмом збудження $I_{\text{зб}}$. Приймаємо, що $I_{\text{д}} = I_{\text{я}}$, тоді при відсутності пускового реостата:

$$I_{\text{я}} = \frac{U}{R_{\text{я}}} = \frac{250}{0,25} = 1000 \text{ А}.$$

За умовою пусковий струм не повинен перевищувати значення $3 I_{\text{ян}}$: $I_{\text{яп}} \leq 3 I_{\text{ян}} = 3 \cdot 50 = 150 \text{ А}$.

Із рис. 37 випливає, що в момент пуску $I_{\text{п}} = \frac{U}{R_{\text{я}} + R_{\text{п}}}$, а опір пускового реостата $R_{\text{п}}$ знаходимо з рівняння двигуна $U_{\text{д}} = E + (R_{\text{я}} + R_{\text{п}}) I_{\text{я}}$:

$$R_{\text{п}} = \frac{U - 3 I_{\text{д}} R_{\text{я}}}{3 I_{\text{д}}} = \frac{250 - 150 \cdot 0,25}{150} = 1,42 \text{ Ом}.$$

3. Трифазний асинхронний двигун має наступні номінальні дані. Потужність на валу $P_{\text{н}} = 3,0 \text{ кВт}$, коефіцієнт потужності $\cos \varphi = 0,8$, частота обертання ротора $n_2 = 1410 \text{ об/хв}$, коефіцієнт корисної дії $\eta = 0,75$, кратність максимального моменту $K_{\text{макс}} = 2,2$, кратність пускового струму $K_{\text{м}} = 3$. Напруга живлення $U_{\text{н}} = 380 \text{ В}$, частота мережі $f = 50 \text{ Гц}$.

Визначити номінальний максимальний момент, номінальний та пусковий струми, кількість пар полюсів, синхронну швидкість та номінальне ковзання.

Проведення розрахунків

Визначаємо номінальний момент двигуна:

$$M_H = \frac{9,55 \cdot P_H}{n_2} = \frac{9,55 \cdot 3000}{1410} = 20,32 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Визначаємо максимальний момент:

$$M_{\text{макс}} = K_{\text{макс}} \cdot M_{\text{ном}} = 2,2 \cdot 20,32 = 44,7 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Визначаємо кількість пар полюсів із співвідношення

$$n_2 = \frac{60 f}{p} : \quad p = \frac{60 f}{n_2} = \frac{60 \cdot 50}{1410} = 2.$$

Обчислимо синхронну швидкість (частота обертання) поля

$$\text{статора: } n_0 = 60 \frac{f}{p} = \frac{60 \cdot 50}{2} = 1500 \text{ об / хв.}$$

Обчислимо номінальне ковзання:

$$S_H = \frac{n_0 - n_2}{n_0} = \frac{1500 - 1410}{1500} = 0,16.$$

Розрахуємо споживану двигуном потужність:

$$P_D = \frac{P_H}{\eta} = \frac{3,00}{0,75} = 4,0 \text{ кВт}.$$

Обчислимо номінальний струм двигуна із співвідношення P_D

$$= \sqrt{3} U_H I_H \cos \varphi:$$

$$I_H = \frac{P_D}{\sqrt{3} U_H \cos \varphi} = \frac{4000}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,8} = 7,6 \text{ А}.$$

Пусковий струм двигуна:

$$I_{\Pi} = 3 \cdot I_H = 3 \cdot 7,6 = 22,8 \text{ А}.$$

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. 1.

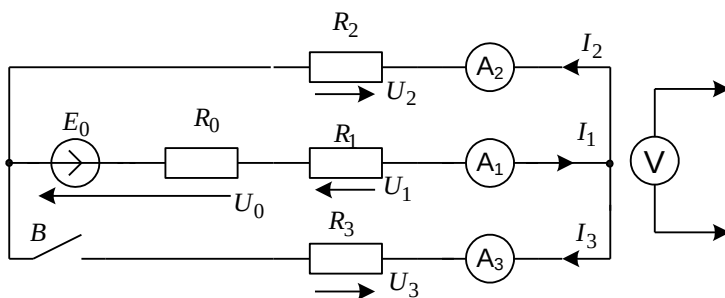


Рис. 1

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 замкненому 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	$U_0+U_1+U_3$
Розмір- ність	A	A	A	B	B	B	B	A	B	B	B
В ро- зімк- нений											
В замк- нений											

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. 1.

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. 2 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 $\cos \varphi$ і зсув фаз φ . Результати обчислень записати у звітні таблиці 1 та 2.

6. Побудувати векторні діаграми струмів та напруг.

Вихідна інформація для обчислень:

$$R = \frac{U_R}{I}; \quad X_C = \frac{U_C}{I}; \quad Z = \frac{U}{I}; \quad \omega = 2\pi f;$$

$$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C}; \quad P = U_R I = RI^2; \quad Q = U_{C1} I = X_C I^2;$$

$$S = UI = \sqrt{P^2 + Q^2}; \quad \cos \varphi = \frac{P}{S}; \quad \varphi = \arccos \cos \varphi;$$

$$C_{12} = C_1 + C_2.$$

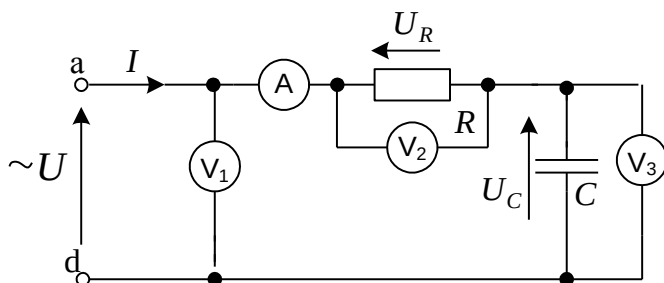


Рис. 1

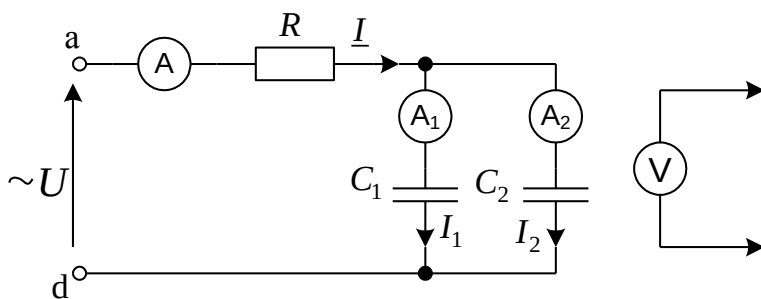


Рис. 2

Звітна таблиця 1

№ з/п	Виміряно						Обчислено						
	I	U_R	U_C	U	R	X_C	Z	C	P	Q	S	$\cos \varphi$	φ
	A	B	B	B	$Ом$	$Ом$	$Ом$	$мкФ$	$Вт$	$вар$	$ВА$		$град.$
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
	A	A	A	B	B	B	B	$Ом$	$Ом$	$Ом$	$Ом$	$мкФ$	$мкФ$	$Вт$
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. 1.

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. 2 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
	A	B	B	B	$Ом$	$Ом$	$Ом$	$Гн$	$Вт$	$вар$	$ВА$		$град.$
1. З осердям													
2. Без осердя													

Звітна таблиця 2

№ з/п	Виміряно						Обчислено										
	I	U_R	U_{L1}	U_{L2}	U	R	X_{L1}	X_{L2}	Z	L_1	L_2	P	Q_1	Q_2	S	$\cos \varphi$	φ
	A	B	B	B	B	$Ом$	$Ом$	$Ом$	$Ом$	Γ_H	Γ_H	$Вт$	$вар$	$вар$	$ВА$		$град.$
1.																	
2.																	

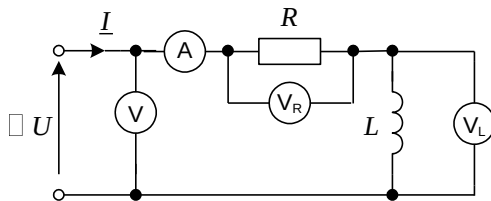


Рис.1

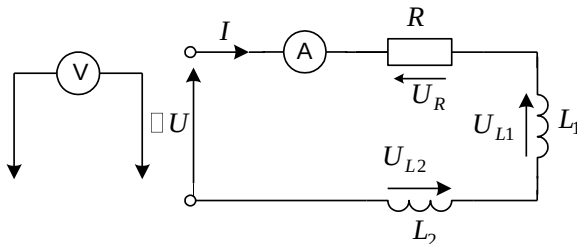


Рис. 2

Рекомендована інформація для обчислень:

$$R = \frac{U_R}{I}; \quad X_L = \frac{U_L}{I}; \quad Z = \frac{U}{I}; \quad Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}; \quad L = \frac{X_L}{2\pi f};$$

$$P = RI^2 = U_R I; \quad Q = U_L I = X_L I^2; \quad S = UI; \quad S = \sqrt{P^2 + Q^2};$$

$$\omega = 2\pi f; \quad \cos \varphi = \frac{P}{S}; \quad \varphi = \arccos \varphi; \quad L_{1,2} = L_1 + L_2.$$

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 1.

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.

$$R = \frac{U_R}{I}; \quad X_C = \frac{U_C}{I}; \quad X_L = \frac{U_L}{I}; \quad \cos \varphi = \frac{P}{UI};$$

$$P = RI^2 = UI \cos \varphi; \quad Q = UI \sin \varphi = XI^2; \quad S = UI = \sqrt{P^2 + Q^2}.$$

Ціна поділки ватметра визначається наступним методом. Якщо зазначено, наприклад, що номінальний струм $I_H = 5\text{ A}$ і напруга $U_H = 150\text{ В}$ для даного ватметра, а шкала містить $n = 150$ поділок то цій шкалі відповідає потужність $P_H = U_H I_H = 150 \cdot 5 = 750\text{ Вт}$.

Зрозуміло, що $C_a = \frac{750}{150} = 5\text{ Вт/под.}$

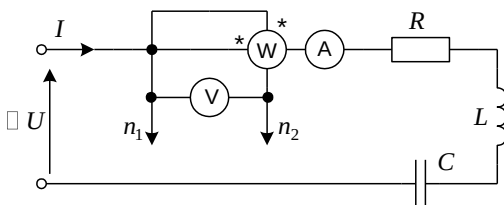


Рис. 1

Звітна таблиця

	Елем./ Велич.	Розмір- ність	Резистор	Котушка	Конден- сатор	Усе коло
Виміряно	U	B				
	I	A				
	P	Bm				
Обчислено	R	$Ом$				
	X_L	$Ом$				
	X_C	$Ом$				
	Z	$Ом$				
	Q	$вар$				
	S	$ВА$				
	$\cos \varphi$					
	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. 1.

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
	A	A	A	A	Bm	B	Om^{-1}	Om^{-1}	Om^{-1}		$вар$	$ВА$	$град.$
RL													
RC													
LC													
RLC													

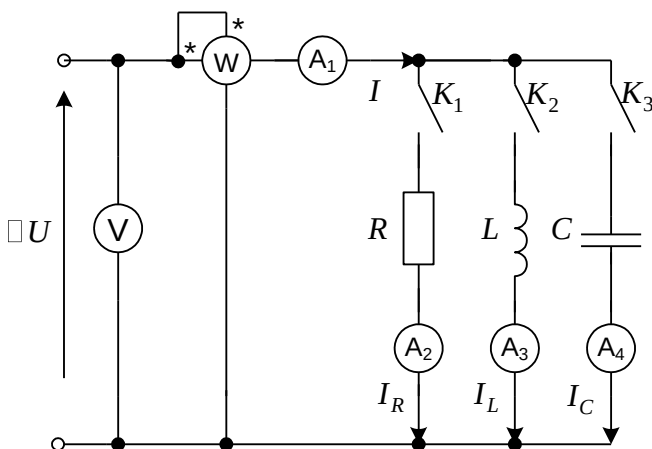


Рис. 1

Вихідна інформація для обчислень:

$$Y = \frac{I}{U}; \quad G = Y \cos \varphi; \quad B = Y \sin \varphi; \quad Y = \sqrt{G^2 + B^2}$$

$$P = UI \cos \varphi; \quad Q = UI \sin \varphi; \quad S = UI;$$

$$\cos \varphi = \frac{P}{UI}; \quad B = B_L + (-B_C).$$

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. 1 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 ВЗ, U_N . Для усіх випадків записати отримані значення у звітну таблицю і порівняти їх із значеннями отриманими експериментально.

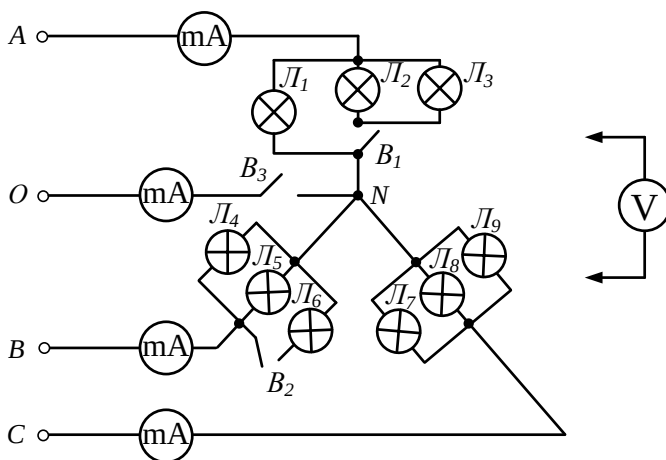


Рис. 1

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
		B	B	B	B	B	B	B	A	A	A	A
З нульовим проводом	A											
	Б											
	В											
Без нульового проводу	A											
	Б											
	В											

Режими роботи		Обчислено								
		3 досліду							3 вектор. діаграм	
		R_A	R_B	R_C	P_A	P_B	P_C	ΣP	U_{ON}	I_N
		O_m	O_m	O_m	B_m	B_m	B_m	B_m	B	A
З нульовим проводом	A									
	B									
	B									
Без нульового проводу	A									
	B									
	B									

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. 1 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 А₁В₁ вимкнена, а фази В₁С₁ та С₁А₁ 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.

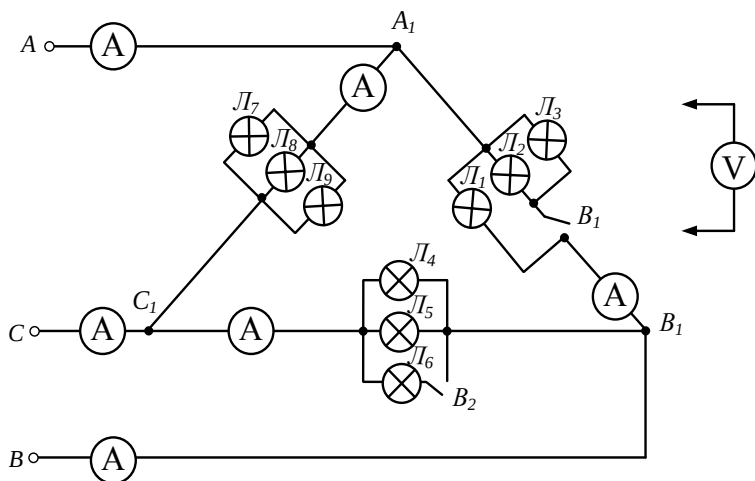


Рис. 1

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}	ΣP_{Φ}
	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. 1). 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 , який індукуює у первинній та вторинній обмотках електрорушійні сили, діючі значення, яких дорівнюють:

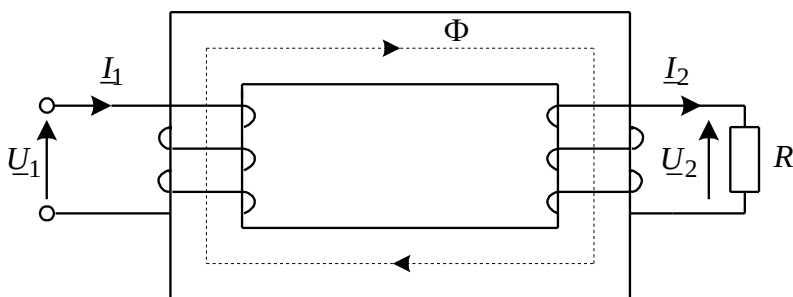


Рис. 1

$$E_1 = 4,44 w_1 f \Phi_m; \quad E_2 = 4,44 w_2 f \Phi_m.$$

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:

$$U_2 = f(I_2), \text{ при } U_1 = \text{const.}$$

Програма роботи.

1. На розібраному трансформаторі ознайомитись з його конструкцією та призначенням окремих вузлів.
2. За участю викладача зібрати схему показану на рис. 2.
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.

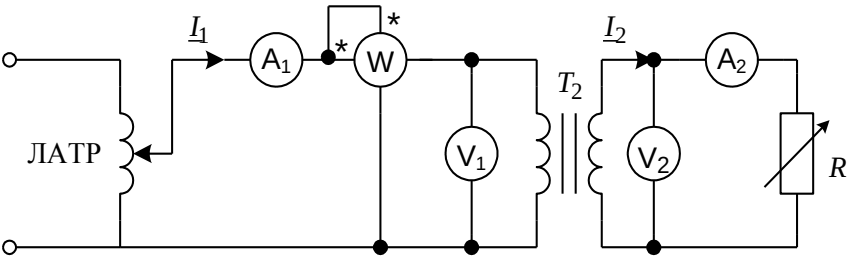


Рис. 2

Звітна таблиця								
Режим	Виміряно					Обчислено		
	U_1	I_1	P_1	U_2	I_2	k	к.к.д	P_2
	B	A	Bm	B	A			Bm
Неробочий режим					0		—	0
					0		—	0
					0		—	0
					0		—	0
					0		—	0
Режим змін-ного наван-таження								

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 увімкненні 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'єднаних 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 напрям обертання магнітного поля. Це досягається зміною місцями будь-яких клем двох лінійних проводів 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	I_2	U_2	P_d	P_2	η	S	$\cos\varphi$
	B	A	Bm	Bm	$об/хв$	B	B	Bm	Bm	$\%$	$\%$	
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 сталюого 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 знаходиться рухома частина машини якір. В пазах якоря розміщена обмотка якоря, виводи секцій якої приєднуються до колектора. Колектор являє собою циліндр з мідних ізолюваних 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 законом 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 клеммах генератора менша від ЕРС на величину падіння напруги в якорі:

$$U = E - I_a \cdot R_a.$$

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 $E = f(I_{z\phi})$ представляє собою залежність ЕРС від струму збудження при роботі генератора в режимі неробочого ходу при постійній частоті обертання і при відсутності навантаження.

Зовнішня характеристика $U = f(I_L)$, представляє собою залежність напруги на клеммах генератора від струму навантаження I_L при $n = \text{const}$ і $R_{z\phi} = \text{const}$. ($R_{z\phi}$ – опір регульовального реостата в колі обмотки збудження). Формулу зовнішньої характеристики отримують із врахуванням того, що: $I_L = I_a - I_{z\phi}$. Проте струмом збудження можна нехтувати внаслідок його відносно малої величини. Таким чином, $U = C_e n \Phi - R_a I_L$.

При збільшенні струму навантаження I напруга на клеммах генератора буде зменшуватись за рахунок падіння напруги в якорі $I_a \cdot R_a$. 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 клеммах 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 клеммах генератора залишається незмінною. Напруга на клеммах такого генератора практично не залежить від навантаження. Регулювальна характеристика $I_{зб} = f(I_r)$, являє собою залежність струму збудження від струму навантаження при постійних номінальних обертах і номінальній напрузі на клеммах генератор. Ця характеристика показує, як необхідно змінювати струм збудження при збільшенні струму навантаження, щоб при постійних номінальних обертах підтримати напругу на клеммах генератора номінально.

При знятті регулювальної характеристики треба встановити на клеммах генератора номінальну напругу. Першу точку слід зняти при відсутності навантаження ($I = 0$), а далі збільшувати струм навантаження на 10 % від номінального 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 $U_r = E = f(I_{зб})$ при $I_r = 0$, $n = const$.

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											
$\leftarrow I_{зб}$ (а)												При зменшенні $I_{зб}$
$\leftarrow U_0$ (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 клеммах 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;

$$U = E + R_{\text{я}} I_{\text{я}},$$

а з врахуванням попередньої формули

$$I_{\text{я}} = \frac{U - C_e n \Phi}{R_{\text{я}}},$$

де $I_{\text{я}}$ – струм якоря; U – напруга на затискачах якоря; $R_{\text{я}}$ – внутрішній опір кола якоря;

$$M = C_M \Phi I_{\text{я}},$$

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 $I_{\text{яп}} = \frac{U}{R_{\text{я}}}$, який перевищує у багато разів номінальний струм якоря $I_{\text{ян}}$ 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_{III} – 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:

$$n = f(I_{3\phi}) \text{ при } U = U_H = \text{const}, I = 0.$$

Характер цієї залежності можна встановити на основі формули

$$n = \frac{U - R_{\alpha} I_{\alpha}}{C_e \Phi}.$$

При зростанні струму збудження шунтової обмотки зростає магнітний потік Φ і з останньої формули видно, що зменшується частота обертання двигуна. Якщо в процесі роботи двигуна $I_{3\phi}$ стане рівним нулю, тобто коло збудження розірветься, то магнітний потік Φ 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: $n = f(I_{\alpha})$ при $U = U_H = \text{const}, I_{3\phi} = \text{const}$.

3. **Регульовальна характеристика двигуна.** Цю характеристику відображає залежність: $I_{3\phi} = f(I_{\alpha})$ при $U = U_H = \text{const}, n = \text{const}$.

Програма роботи.

1. На розібраному двигуні ознайомитись з його конст-рукцією 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
$I_{зб}$	A								
n	об/хв								

3. Зняти зовнішню характеристику двигуна $n = f(I_J)$ 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_J	A								
n	об/хв								

4. Зняти регульовальну характеристику двигуна $I_{зб} = f(I_J)$ 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_J	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 набува-

ють кольору металу, прониклого 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 самотійно 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 самотійно 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 в цілому. 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 зменшується 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 $0,02 - 0,03 \text{ мкф/см}^2$, для промислової частоти $f = 50 \text{ Гц}$ ємнісний опір становить $X_C = 125 \text{ кОм/см}^2$, що майже в 50 разів більше від резистивного опору $R = 2,5 \text{ кОм/см}^2$.

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 порошком, 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 настає 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 цьому 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 $I_{д.д.} = 10 \text{ мА}$.** 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	$U_{\text{доп}}, В$	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	$U_{\text{доп}}, В$	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 підготувати 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, небезпечно 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 нижнього 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 шокowego стану наступні: звужуються зіниці очей, обличчя набуває рожевого відтінку, з'являються слабке дихання і пульс.

10. Продовжувати робити штучне дихання після того, як з'явилося 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-обслуговуючим 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, $\omicron$	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
$\Theta, \vartheta(\theta)$	тета	Υ, 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 дільних одиниць вимірювання

Множ- ник	Приста- вка	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

Множ- ник	Приста- вка	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	<i>A</i>
Електрична напруга	вольт	<i>B</i>
Напруженість електричного поля	вольт на метр	<i>B/м</i>
Електричний опір	ом	<i>Ом</i>
Електрична провідність	сіменс	<i>См</i>
Електрична ємність	фарада	<i>Ф</i>
Індуктивність	генрі	<i>Гн</i>
Магнітна індукція	тесла	<i>Тл</i>
Магнітний потік	вебер	<i>Вб</i>
Напруженість магнітного поля	ампер на метр	<i>A/м</i>

Питомий опір, провідність та температурний коефіцієнт опору матеріалів

Матеріал	Питомий опір ρ при $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\text{Ом}\cdot\text{м}^2\cdot\text{м}^{-1}$	Питома провідність γ , $\text{м}\cdot\text{Ом}^{-1}\cdot\text{м}^{-2}$	Середній темп- перат. коефіц. опору, α , $^{\circ}\text{C}^{-1}$
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:

$$67I_1 - 30I_2 - 12I_3 = 140, \quad (1)$$

$$-30I_1 + 106I_2 - 34I_3 = -80, \quad (2)$$

$$-12I_1 - 34I_2 + 64I_3 = -10. \quad (3)$$

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

$$I_1 - 0,4478I_2 - 0,1791I_3 = 2,0896, \quad (4)$$

$$I_1 - 3,533I_2 + 1,1333I_3 = 2,6667, \quad (5)$$

$$I_1 + 2,8333I_2 - 5,3333I_3 = 0,8333. \quad (6)$$

Відніmemo від рівняння (4) рівняння (5), а від рівняння (5) – рівняння (6), і отримаємо наступні рівняння:

$$\begin{aligned} I_1 - I_1 - 0,4478I_2 - (-3,533I_2) - 1791I_3 - \\ - 1,1333I_3 = 2,0896 - 2,6667; \quad I_1 - I_1 - 3,533I_2 - 2,8333I_2 + \\ + 1,1333I_3 - (-5,3333I_3) = 2,6667 - 0,8333, \\ 3,0856I_2 - 1,3124 = -0,5771, \end{aligned} \quad (7)$$

$$-6,366I_2 + 6,4667I_3 = 1,8334. \quad (8)$$

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:

$$I_2 - 0,4253I_3 = -0,1870, \quad (9)$$

$$I_2 - 1,0157I_3 = -0,2880. \quad (10)$$

Від десятого рівняння віднімаємо дев'яте і одержимо:

$$I_2 - I_2 - 1,0157I_3 - (-0,4253I_3) = -0,1870 - (-0,2880),$$

звідки $I_3 = 0,171$. Тепер підставляємо знайдене значення I_3 в рівняння (9) і знаходимо I_2 .

$$I_2 - 0,4253 \cdot 0,171_3 = -0,1870; \quad I_2 = -0,1142 \text{ A.}$$

Підставляючи значення I_2 та I_3 в рівняння (4) визначаємо I_1 .

$$I_1 - 0,4478 \cdot (-0,1142) - 0,1791 \cdot 0,171_3;$$

$$I_1 = 2,0896 + 0,0306 - 0,051 = 2,069;$$

$$I_1 = 2,069 \text{ A.}$$

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:

$$\Delta = \begin{vmatrix} 3 & 3 & -4 \\ 4 & 3 & -3 \\ 1 & 1 & -8 \end{vmatrix} = 3 \begin{vmatrix} 3 & -3 \\ 1 & -8 \end{vmatrix} - 3 \begin{vmatrix} 4 & -3 \\ 1 & -8 \end{vmatrix} + (-4) \begin{vmatrix} 4 & 3 \\ 1 & 1 \end{vmatrix} = 20.$$

$$\Delta I_1 = \begin{vmatrix} 10 & 3 & -4 \\ 10 & 3 & -3 \\ 10 & 1 & -8 \end{vmatrix} = 10 \begin{vmatrix} 3 & -3 \\ 1 & -8 \end{vmatrix} - 3 \begin{vmatrix} 10 & -3 \\ 10 & -8 \end{vmatrix} + (-4) \begin{vmatrix} 10 & 3 \\ 10 & 1 \end{vmatrix} = 20.$$

$$\Delta I_2 = \begin{vmatrix} 3 & 10 & -4 \\ 4 & 10 & -3 \\ 1 & 10 & -8 \end{vmatrix} = 3 \begin{vmatrix} 10 & -3 \\ 10 & -8 \end{vmatrix} - 10 \begin{vmatrix} 4 & -3 \\ 1 & -8 \end{vmatrix} + (-4) \begin{vmatrix} 4 & 10 \\ 1 & 10 \end{vmatrix} = 20.$$

$$\Delta I_3 = \begin{vmatrix} 3 & 3 & 10 \\ 4 & 3 & 10 \\ 1 & 1 & 10 \end{vmatrix} = 3 \begin{vmatrix} 3 & 10 \\ 1 & 10 \end{vmatrix} - 3 \begin{vmatrix} 4 & 10 \\ 1 & 10 \end{vmatrix} + 10 \begin{vmatrix} 4 & 3 \\ 1 & 1 \end{vmatrix} = -20.$$

Невідомі струми I_1 , I_2 та I_3 визначаємо за формулами:

$$I_1 = \frac{\Delta I_1}{\Delta} = \frac{20}{20} = 1 \text{ A},$$

$$I_2 = \frac{\Delta I_2}{\Delta} = \frac{20}{20} = 1 \text{ A},$$

$$I_3 = \frac{\Delta I_3}{\Delta} = \frac{20}{-20} = -1 \text{ A}.$$

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 комплексній площині, рис. 1.

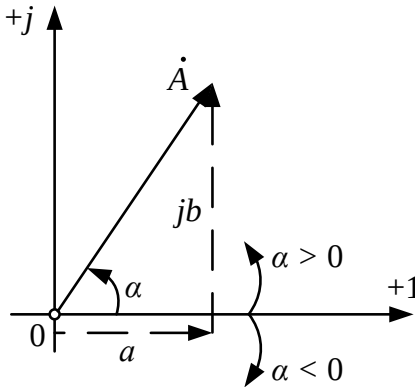


Рис.1. Зображення комплексного числа на площині

На комплексній площині з прямокутною системою координат по осі абсис, 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 $\underline{A} = A(\cos \alpha + j \sin \alpha)$;

– 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,

$\alpha = \arctg \frac{b}{a}$ – **аргумент** комплексного числа.

Кут α на комплексній площині відкладається від дійсної півосі абсис 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:

$$a < b, \quad b > 0 \quad (2 \text{ чверть}) \quad \alpha = \pi - \arctg \frac{b}{|a|};$$

$$a < 0, \quad b < 0 \quad (3 \text{ чверть}) \quad \alpha = \pi + \arctg \frac{|b|}{|a|};$$

$$a > 0, \quad b > 0 \quad (4 \text{ чверть}) \quad \alpha = -\arctg \frac{|b|}{|a|}.$$

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:

$$\underline{A} = \underline{A}_1 \cdot \underline{A}_2 = (a_1 a_2 - b_1 b_2) + j(a_1 b_2 + a_2 b_1).$$

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:

$$\underline{A} = 5e^{-60^\circ} = 5 \cos(-60^\circ) + j5 \sin(-60^\circ) = 2,5 - j4,33.$$

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:

$$\text{модуль комплексного числа } \sqrt{(-18)^2 + 8^2} = 19,7,$$

аргумент комплексного числа

$$\alpha = \pi - \arctg \frac{b}{|a|} = 180^\circ - \arctg \frac{8}{|-18|} = 156,04^\circ.$$

$$\text{Отже, } \underline{A} = -18 + j8 = \underline{A} = 19,7e^{-j156,04^\circ}.$$

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

$$\underline{A}_1 = 30e^{-j70^\circ} = 30 \cos(-70^\circ) + j30 \sin(-70^\circ) = 10,26 - j28,195$$

$$\underline{A}_2 = 20e^{j20^\circ} = 20 \cos(20^\circ) + j20 \sin(20^\circ) = 18,79 + j6,84,$$

$$\text{тоді } 30e^{-j70^\circ} - 20e^{j20^\circ} = 10,26 - j28,195 - 18,79 + j6,84 = -8,53 - j35,03.$$

Приклад 4. Помножити два комплексних числа

$$\underline{A}_1 = 4e^{j38^\circ} \quad \text{і} \quad \underline{A}_2 = 5e^{-j60^\circ}.$$

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:

$$i_1 = 14,1 \sin \omega t^{-1} \quad \rightarrow \quad \underline{I}_1 = \frac{14,1}{\sqrt{2}} e^{j0^\circ} = 10$$

$$i_2 = 5\sqrt{2} \sin(\omega t - 60^\circ) \rightarrow \underline{I}_2 = \frac{5\sqrt{2}}{\sqrt{2}} e^{-j60^\circ} = 5e^{-j60^\circ}$$

$$u_1 = 220\sqrt{2} \cos \omega t = 220\sqrt{2} \sin(\omega t + 90^\circ) \rightarrow \underline{U}_1 = \frac{220\sqrt{2}}{\sqrt{2}} e^{j90^\circ} = j220.$$

Зворотній перехід:

$$\underline{I}_3 = 5 \rightarrow i_3 = 5\sqrt{2} \sin \omega t$$

$$\underline{I}_4 = 10e^{-j50^\circ} \rightarrow i_4 = 10\sqrt{2} \sin(\omega t - 50^\circ)$$

$$\underline{U}_2 = 50 + j50 = 50\sqrt{2}e^{45^\circ} \rightarrow u_2 = 100 \sin(\omega t + 45^\circ).$$

Закон Ома в комплексній формі

До кола з послідовним з'єднанням елементів R , L , C (рис. 50) прикладено синусоїдну напругу, під дією якої проходить синусоїдний струм, їх комплексні зображення будуть $\underline{U}$ та $\underline{I}$:

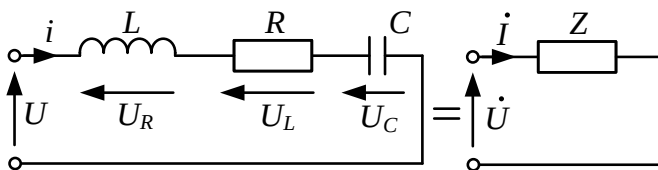


Рис.50. Послідовне з'єднання елементів R, L, C

$$u = U_m \sin(\omega t + \psi_i) \quad \underline{U} = \frac{U_m}{\sqrt{2}} e^{j\psi_u} = U e^{j\psi_u}$$

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi_i) \quad \underline{I} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} e^{j\psi_i} = I e^{j\psi_i}$$

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;

$$\underline{U}_L = \underline{I} X_L e^{j\frac{\pi}{2}} = +jX_L \underline{I} \text{ – випереджає струм на } 90^\circ;$$

$$\underline{U}_C = \underline{I} X_C e^{-j\frac{\pi}{2}} = -jX_C \underline{I} \text{ – відстає від струму на } 90^\circ.$$

Підставляючи ці значення, одержимо:

$$\underline{U} = R\underline{I} + jX_L \underline{I} - jX_C \underline{I} = \left[R + j(X_L - X_C) \right] \underline{I} = \underline{Z} \underline{I}.$$

Це рівняння закон Ома в символічній (чи комплексній) формі.

$$\text{Опір } \underline{Z} = R + jX = R + j(X_L + X_C) = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)$$

називається **комплексним повним опором схеми**, позначається великою літерою Z з рискою знизу.

При відомих комплексних значеннях струму і напруги комплексний опір визначається як:

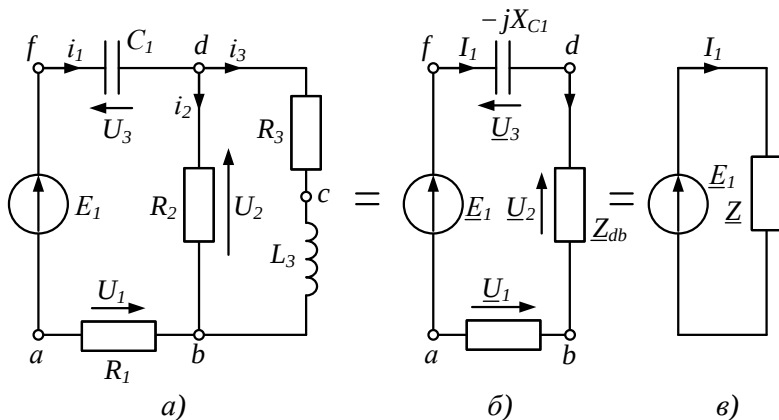
$$\underline{Z} = \frac{\underline{U}}{\underline{I}} = \frac{Ue^{j\psi_u}}{Ie^{j\psi_i}} = \frac{U}{I} e^{j(\psi_u - \psi_i)} = Ze^{j\varphi} = Z \cos \varphi + jZ \sin \varphi = R + jX \quad \text{Вели-}$$

$$\varphi = (\psi_u - \psi_i) \quad R = Z \cos \varphi \quad X = Z \sin \varphi.$$

чина, обернена комплексному опорові, називається **комплексною провідністю**:

$$\underline{Y} = \frac{1}{\underline{Z}} = \frac{1}{Ze^{j\varphi}} = Ye^{-j\varphi} = Y \cos \varphi + jY \sin \varphi = G - jB.$$

Приклад 1. Параметри електричного кола, зображеного на рисунку мають такі значення: $e_1 = 183,8 \sin 314t$ В, $C_1 = 187,3$ мкФ; $R_1 = 1$ Ом; $R_2 = 20$ Ом; $R_3 = 4$ Ом; $L_3 = 25,48$ мГн. Визначити струми у вітках електричного кола.



Розв'язок. Комплексне діюче значення ЕРС:

$$\underline{E}_1 = \frac{E_m}{\sqrt{2}e^{j0^\circ}} = 130 \text{ В.}$$

Реактивні опори:

$$X_{L_3} = \omega L_3 = 314 \cdot 25,48 \cdot 10^{-3} = 8 \text{ Ом;}$$

$$X_{C_1} = \frac{1}{\omega C_1} = \frac{1}{314 \cdot 187,3 \cdot 10^{-6}} = 17 \text{ Ом.}$$

Комплексний опір паралельних віток:

$$\underline{Z}_{bd} = \frac{R_2 (R_3 + jX_{L3})}{R_2 + R_3 + jX_{L3}} = \frac{20(4 + j8)}{20 + 4 + j8} = 5 + j5 = 7,07e^{j45^\circ} \text{ Ом}.$$

Комплексний опір усього кола:

$$\underline{Z}_1 = R_1 + \underline{Z}_{bd} - jX_{C1} = 7 + 5 + j5 - j17 = 12 - j12 = 17e^{j45^\circ} \text{ Ом}.$$

Комплексні струми і напруги в колі:

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{E}}{\underline{Z}} = \frac{130}{17e^{j45^\circ}} = 7,65e^{+j45^\circ}$$

$$\underline{U}_R = R\underline{I} = 7 \cdot 7,65e^{+j45^\circ} = 53,5 \exp(j45^\circ) \text{ В},$$

$$\underline{U}_2 = \underline{Z}_{bd} \underline{I}_1 = 7,07 \exp(j45^\circ) \cdot 7,65 \exp(j45^\circ) = j54,0 \text{ В},$$

$$\underline{U}_3 = -jX_{C1} \underline{I}_1 = -j17 \cdot 7,65 \exp(j45^\circ) = 130,0 \exp(-j45^\circ) \text{ В},$$

$$\underline{I}_3 = \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_3} = \frac{j54}{4 + j8} = 6 \exp(j26^\circ 30') \text{ А}.$$

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 електротехнічних 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, сприйнятій для спостерігача.

Робота електровимірювальних приладів полягає в переміщенні їх рухомої частини, спричинюваному механічними зусиллями, що виникають у приладі внаслідок одного з проявів елект-

ричного струму (теплого, 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 (показчик – стрілка, світлова пляма) та цифрові (показчик – 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; 2,0; 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 $(+10 \div +35)^{\circ}\text{C}$, вологість 80 %,
- **група Б:** температура $(-30 \div +40)^{\circ}\text{C}$, вологість 90 %,
- **група В1:** температура $(-40 \div +50)^{\circ}\text{C}$, вологість 95 %,
- **група В2:** температура $(-50 \div +50)^{\circ}\text{C}$, вологість 95 %,
- **група В:** температура $(-50 \div +80)^{\circ}\text{C}$, 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. 1.

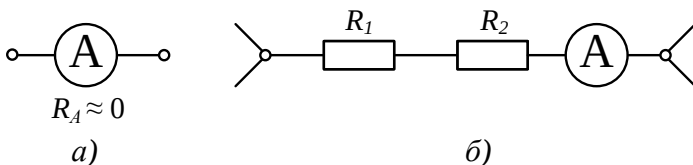


Рис. 1. Схема ввімкнення амперметра

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. 2.

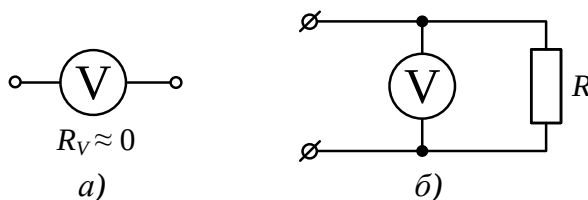


Рис. 2. Схема ввімкнення вольтметра

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 обмотка яких вмикається послідовного, а напругова – паралельно до елемента.

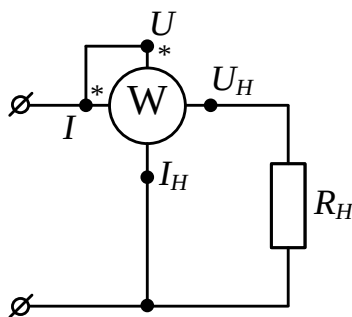


Рис. 3. Схема ввімкнення ватметра.

У трифазних колах при симетричному навантаженні використовують один ватметр рис. 4а. В трифазних колах із симетричним навантаженням за допомогою ватметра можна виміряти реактивну потужність рис. 4б.

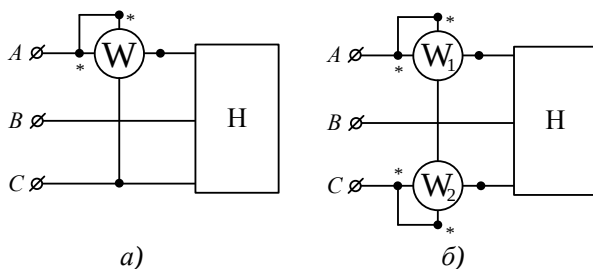


Рис. 4. Схема ввімкнення ватметрів у трифазних колах

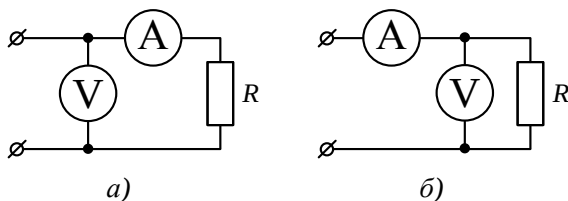


Рис. 5. Схема для вимірювання опору

Вимірювання опору. Найпростішим способом вимірювання опору є **метод амперметра-вольтметра** (рис. 5а). Для вимірювання малих опорів використовують схему на рис. 5б.

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. 6).

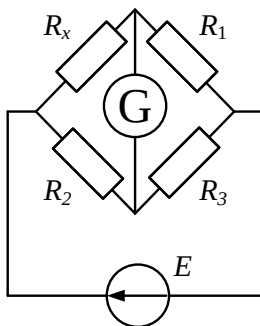


Рис. 6. Схема вимірювального моста

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 $R_x R_3 = R_1 R_2$ звідки $R_1 = R_x = R_1 R_2 / R_3$.

Вимірювальні мости мають декілька діапазонів вимірювання опорів від $0,01 \text{ Ом}$ 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, звірем з еталоном. Помилка у вимірюванні називається **похибкою**.

Для характеристики точності вимірювальних приладів використовують поняття похибки, які кваліфікують: за способом вимірювання (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:

$$\gamma = \frac{\Delta A}{A_H} 100\%.$$

Якщо абсолютна та відносна похибки характеризують точність вимірювання, то приведена похибка характеризує 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 $I_1 = 25,5$ А, тоді як дійсне значення було $I = 25$ А. Визначити абсолютну і відносну похибки вимірювання.

Розв’язок. Абсолютна похибка рівна:

$$\Delta I = I_1 - I = 25,5 - 25 = 0,5 \text{ А.}$$

Відносна похибка рівна: $\delta = \frac{\Delta I}{I_H} 100\% = \frac{0,5}{25} \cdot 100 = 2\%$.

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 дійсного значення 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_n): $\gamma = \frac{\Delta I}{I_n} 100\%$.

Відповідно, в формулі $\gamma = 1,5\%$ $I_n = 5\text{ А}$.

Підставивши числові значення знаходимо

$$1,5 = \frac{(\Delta I)_{\max}}{5} 100\%$$

$$(\Delta I)_{\max} = \frac{1,5 \cdot 5}{100} = 0,075\text{ А}.$$

Приклад 4. Номінальний струм амперметра 5 А , опір амперметра $0,02\text{ Ом}$. Який струм проходить в колі, якщо амперметр зашунтований опором $0,005\text{ Ом}$, показує $4,5\text{ А}$.

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:

$$\frac{I_A}{I_{ш}} = \frac{R_{ш}}{R_A}, \text{ звідси}$$

$$I_{ш} = I_A \frac{R_A}{R_{ш}} = 4,5 \frac{0,02}{0,005} = 18\text{ А}.$$

Струм I в колі на основі першого закону Кірхгофа дорівнює сумі струмів через амперметр та через шунт $I_{ш}$:

$$I = I_A + I_{ш} = 4,5 + 18 = 22,5\text{ А}.$$

Приклад 5. Через амперметр, номінальний струм якого $I_{ном} = 5\text{ А}$ і опір $0,1\text{ Ом}$ проходить струм 4 А ; вольтметр номінальна напруга якого $U_{ном} = 150\text{ В}$. і опір 5000 Ом підключений на напругу $U = 120\text{ В}$. Визначити витрати потужності в цих приладах.

Розв'язок. Втрати потужності в амперметрі

$$P_A = R_A I_A^2 = 0,1 \cdot 4^2 = 1,6\text{ Вт}.$$

Втрати потужності у вольтметрі

$$P_V = I_V U_V = \frac{U_V}{R_V} U_V = \frac{U_V^2}{R_V} = \frac{120^2}{5000} = 2,88\text{ Вт}.$$

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 $I_n = 5\text{ А}$, опір якого $R_{A1} = 0,1\text{ Ом}$. Тоді було прийнято рішення вимірювати струм двома паралельно підключеними між собою амперметрами при цьому $R_{A2} = 0,08\text{ Ом}$. Визначити покази обох амперметрів при вимірюванні сумарного струму $I = 8\text{ А}$.

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:

$$\frac{I_{A1}}{I_{A2}} = \frac{R_{A2}}{R_{A1}} \text{ або } \frac{I_{A1}}{I_{A2}} = \frac{0,1}{2,25} = 1,25.$$

Відповідно замість струму I_{A2} можна в рівняннях записати:

$$I_{A2} = 1,25 I_{A1} \quad I_{A1} + 1,25 I_{A1} = 8 \rightarrow$$

$$I_{A1} = \frac{8}{2,25} = 3,56 \text{ A.} \quad I_{A2} = 1,25 I_{A1} = 1,25 \cdot 3,56 = 4,44 \text{ A.}$$

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.

$$\begin{array}{lll} R_{A1} = 0,1 \text{ Ом} & I_{A1} = 3,56 \text{ A} & I_{H1} = 5 \text{ A} \\ R_{A2} = 0,08 \text{ Ом} & I_{A2} = 4,56 \text{ A} & I_{H1} = 5 \text{ A.} \end{array}$$

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 Беккарія (1716 – 1781) під назвою «Про електрику штучну і природню» (1753). В ній Беккарія окрім інших важливих висновків показав, що немає чіткої межі між провідниками та ізоляторами, запровадивши таким чином поняття електричного опору. В цей же час Беккарія 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 досліджень 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 досліді болонського професора Луїджі Гальвані (1737 – 1798), який фактично підсумував тодішні дослідження про вплив електрики на живі організми. Його всесвітньовідомі досліді 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 утво-

рюють 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 (<i>Китай</i>)
VI ст. до н.е.	Зібрано перші відомості про електрику і магнетизм (<i>Фалес Мілетський, Др. Грец.</i>)
1269 р.	Детально описано магнетизм, винайдено магнітний графометр (<i>П. Перегріно, Іт.</i>)
1650 р.	Винайдено електростатичний генератор (<i>О. фон Геріке, Німеччина</i>)
1706 р.	Створено першу електричну машину (<i>Ф. Гауксбі, Великобританія</i>)
1710 р.	Відкрито свічення повітря при електророзряді (<i>Ф. Гауксбі, Великобританія</i>)
1729 р.	Відкрито явище електропровідності (<i>С. Грей, Великобританія</i>)
1737 р.	Винайдено прилад для вимірювання електрики (<i>Ш. Дюфе, Франція</i>) (рис.58)
1745 р.	Винайдено пристрій для створення електроенергії – перший конденсатор – лейденську банку (<i>незалежно Е. Клейст, Померанія, П. ван Мушенбрук, Голан.</i>) (рис.59) Винайдено “гromову машину” – пристрій для утворення електричних зарядів (<i>Г. Ріхман, Росія</i>)
1745 – 51 рр.	Винайдено “електричний гномоном” – один з перших електрометрів (<i>М. Ломоносов, Росія</i>)
1747 – 52 рр.	Доказано електричну природу блискавки, закон збереження заряду, винайдено громовідвід, плоский конденсатор (<i>Б. Франклін, США</i>)

- 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 електрозарядження 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, Великобрит.*) (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 електрогенератор – “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 звучання котушки зі струмом, передано звуковий сигнал за допомогою електричного струму (*Ч. Пейдж, США*)
Винайдено тангенціальний гальванометр – тангенсбусоль (*К. Пуйє, Франція*) (рис. 70)
- 1841 р.** Відкрито теплову дію електричного струму (*Д. Джоуль, Великобританія*)
Винайдено синхронний електродвигун змінного струму (*Ч. Уїтстон, 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 – прабраз 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 індуктивністю 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 електроре-
нергії на далекі віддалі (*М. Депре, Франція*)
Винайдено термоелектричний генератор (*Л. Голлар, Франція*)
- 1882 р. Винайдено електрогефест – дугове електрозварю-
вання (*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 змін-ного струму (Прага) і ряд електростанцій постій-ного струму, вдосконалено та детально дослідже-но катодні, неонові і розжарювальні лампи (*укра-їнець І. Пулюй*)
- 1884 р.** Сконструйовано трансформатор із замкненою ма-гнітною системою (*брати Гонкінсон, Великоб-ританія*)
- 1885 р.** Винайдено систему двофазного змінного струму (*Г. Ферраріс, Італія*)
 Виявлено вихрові електричні струми – струми Фуко (*Л. Фуко, Франція*)
- 1886 р.** Доказано випромінювання електромагнітних хвиль (радіохвиль), встановлено, що теплота і сві-тло 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, Ні-меччина*)
 Створено перше магнето (*Б. Бош, Німеч.*)
 Відкрито проходження електроструму через пові-тря (*У. Боргман, Росія*)
- 1888 р.** Винайдено генератор трифазного струму, схеми увімкнення електромашин “зіркою” і “трикутни-ком” (*М. Доливо-Доброволь-ський з Одеси*) (рис. 79)

Відкрито обертове магнітне поле – основу сучасних електродвигунів (*хорват Н. Тесла, США, Г. Ферраріс, 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.78а)
- 1890 р.** Створено генератор змінного струму різних частот (*хорват Н. Тесла, США*)
Винайдено трифазний трансформатор (*М. Доливо-Добровольський з Одеси*) (рис. 78б)
- 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 безпроводникове телеграфування – радіотелеграф (*Г. Марконі, Італія, А. Попов, Росія*) (рис. 80, 81)
 Відкрито безпроводникове 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. Панапексі, 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.** Спроековано 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. Міліонічиков 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.*)

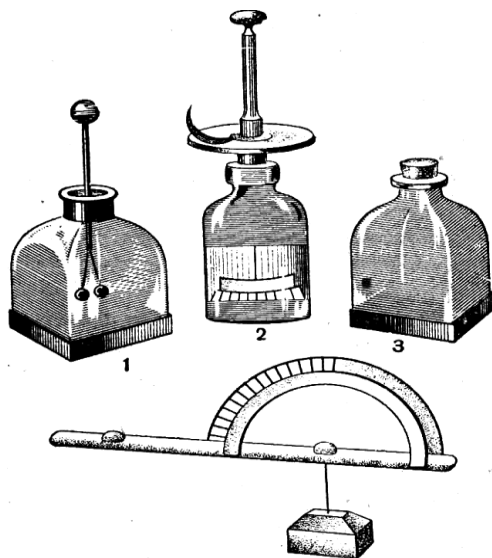


Рис. 58. Одні з перших електрометрів (*XVIII ст.*)

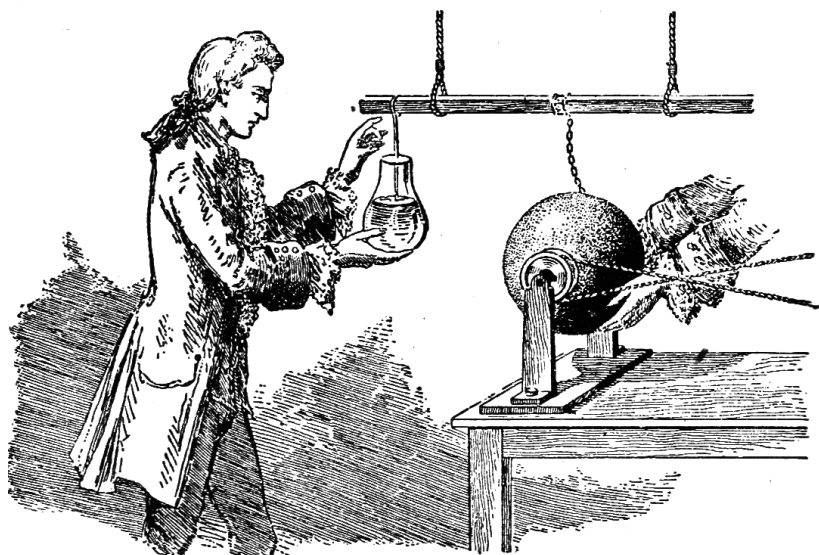


Рис. 59. Лейденський дослід (сер. XVIII ст.)

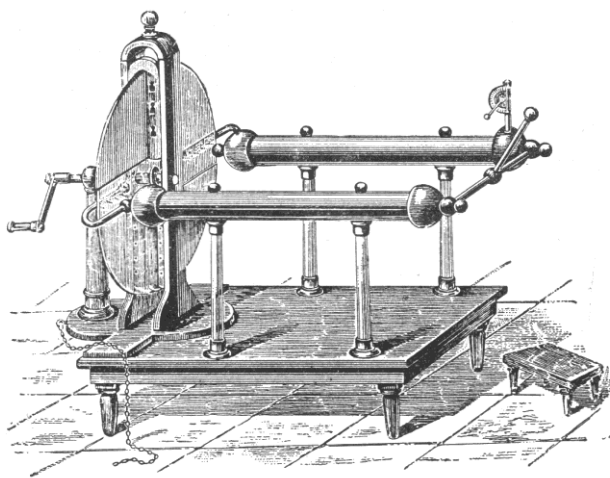


Рис. 60. Електрична обертальна машина (кін. XVIII ст.)

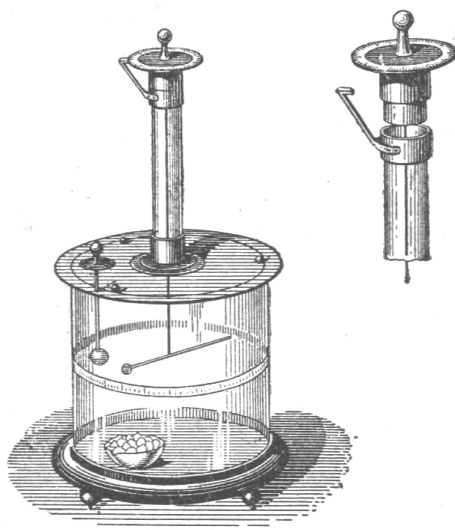


Рис. 61. Крутильна вага Ш. Кулона для визначення електровзаємодії (Франція, 1785)

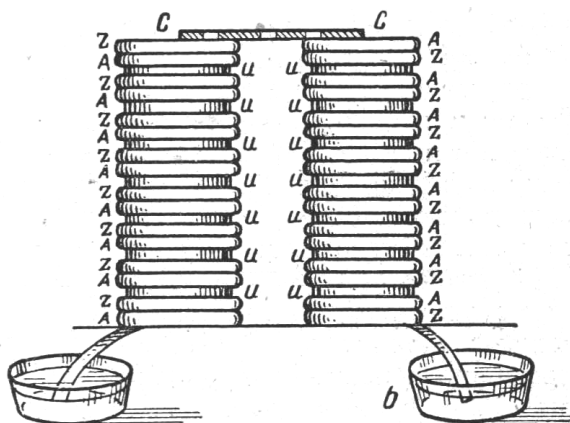


Рис. 62. Електрична батарея А. Вольта (Італія, 1799)

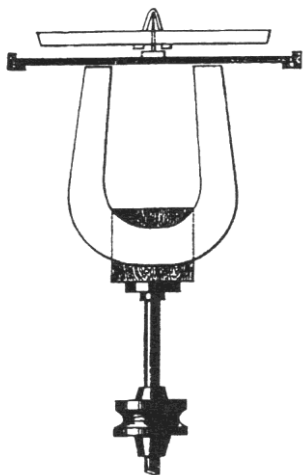


Рис. 63. Намагнічувальне кільце Д. Араго (Фр., 1820)

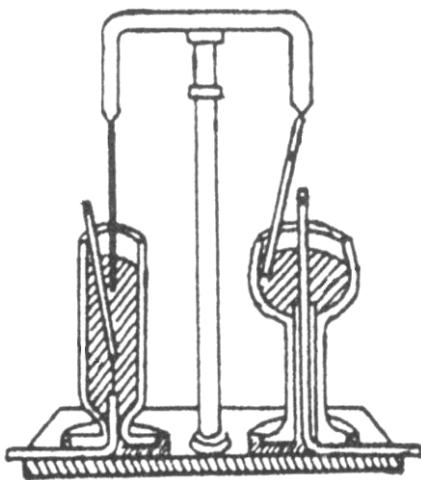


Рис. 64. Модель двигуна М. Фарадея (Вел., 1821)

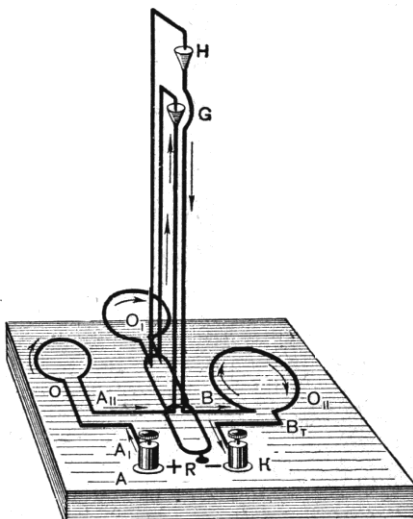
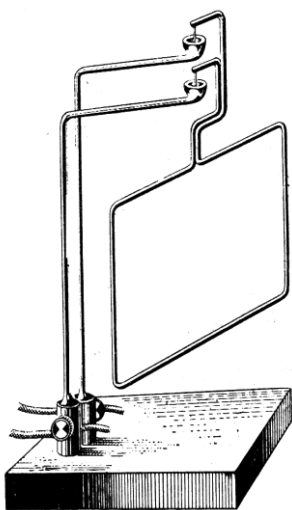


Рис. 65. Пристрій і схема дослідів А. Ампера (Франція, 1820)

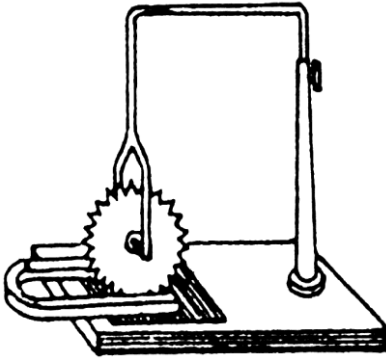


Рис. 66. Модель електро-
двигуна – колесо П. Барлоу
(Великобританія, 1820)

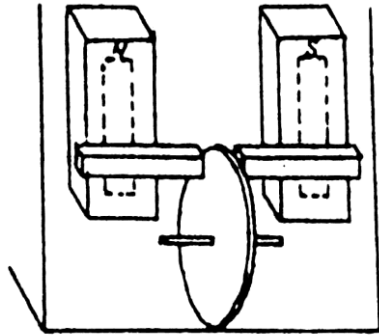


Рис. 67. Перший електро-
генератор – диск Фарадея
(Великобританія, 1831)

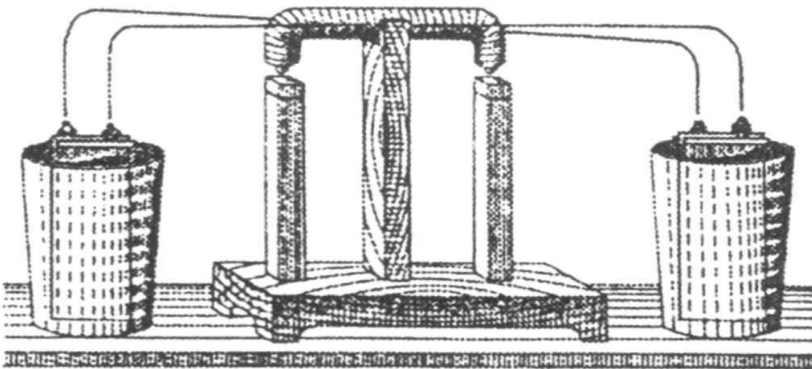


Рис. 68. Електричний двигун Дж. Генрі (США, 1831)

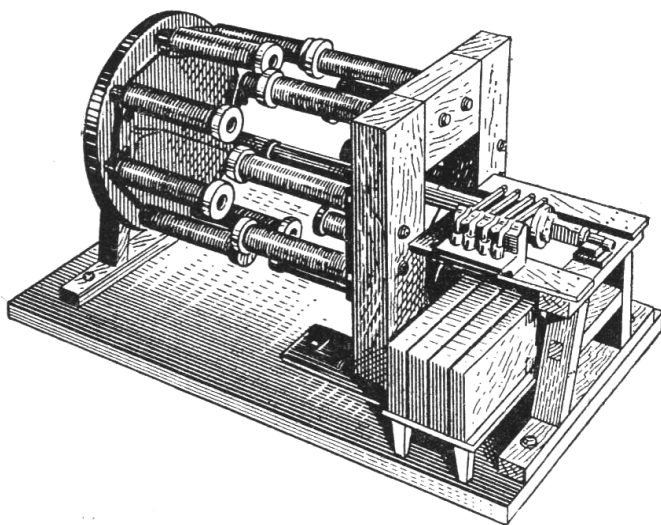


Рис. 69. Модель електродвигуна Б. Якобі (Росія, 1834)

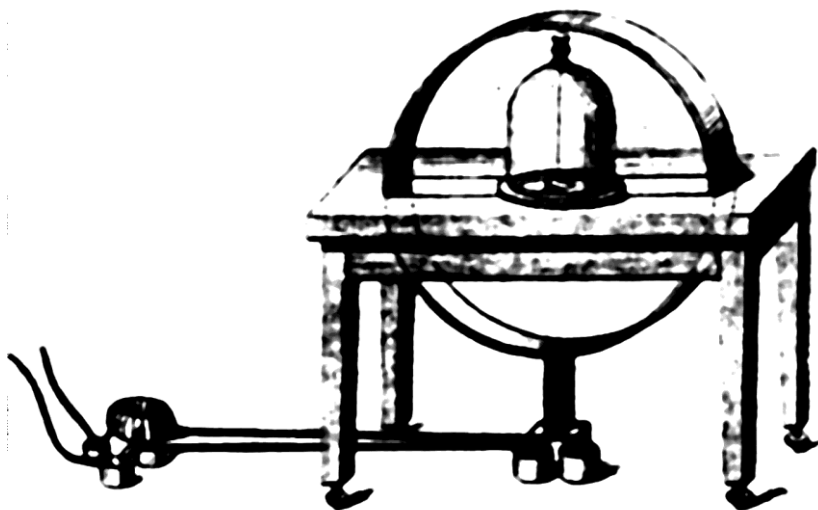


Рис. 70. Тангенс-бусоль (гальванометр) К. Пуйє (Фр., 1839)

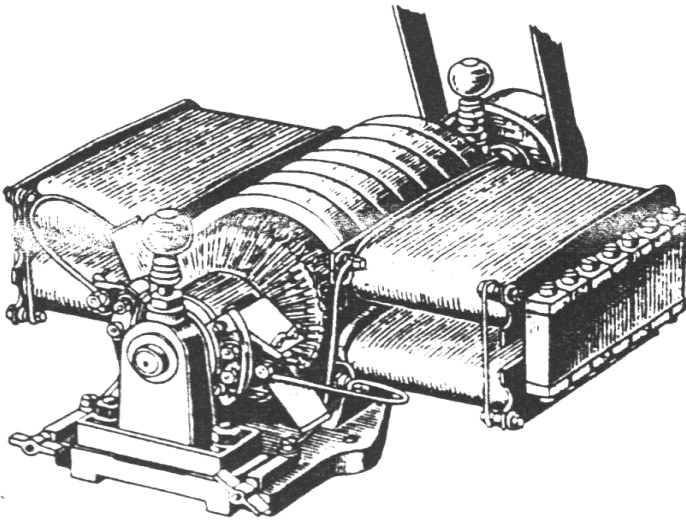


Рис. 71. Динамомашина з якорем Ф. Сіменса (Нім., 1856)

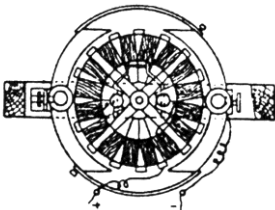
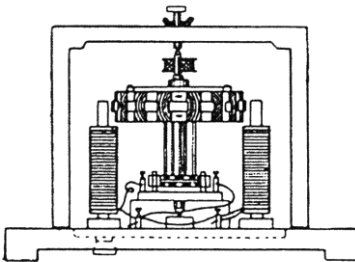


Рис. 72. Електродвигун
А. Починотті (Італія, 1860)

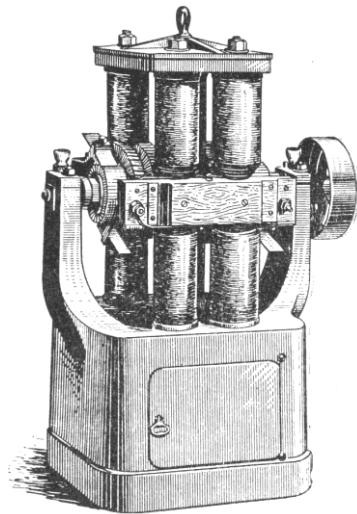


Рис. 73. Електрогенератор
З. Грамма (Франція, 1870)

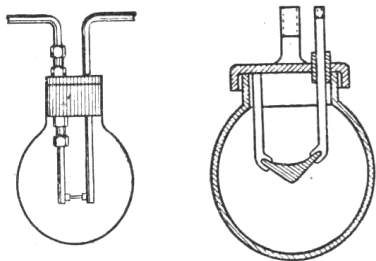


Рис. 74. Схема електролампи розжарення А. Лодигіна
(Росія, 1872)

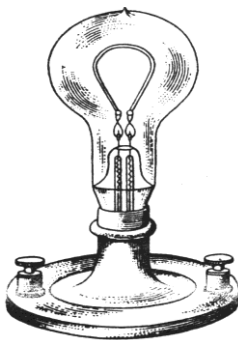


Рис. 75. Електролампа
Т. Едісона (США, 1879-84)

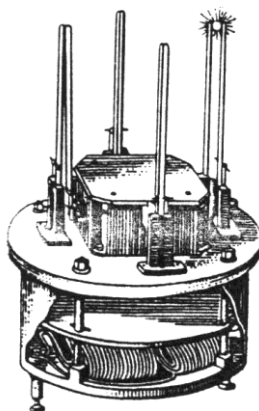
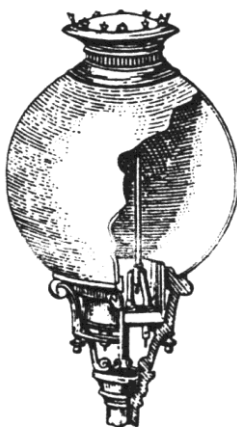
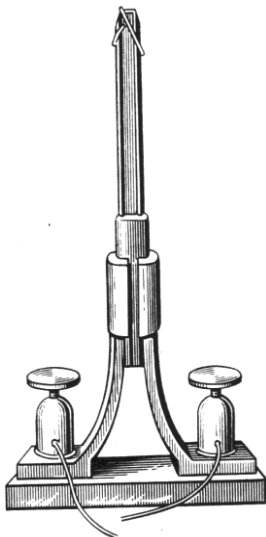


Рис. 76. Електродугові лампи – «свічки Яблочкова»
(Росія, 1876)

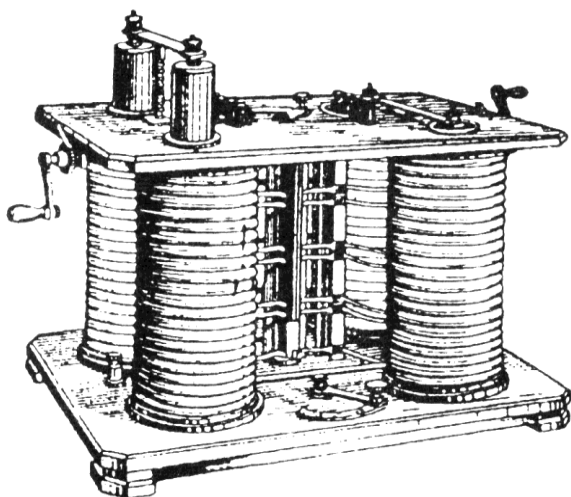


Рис. 77. Багатообмотковий трансформатор Л. Голара та Дж.В. Гіббса (США, 1885)

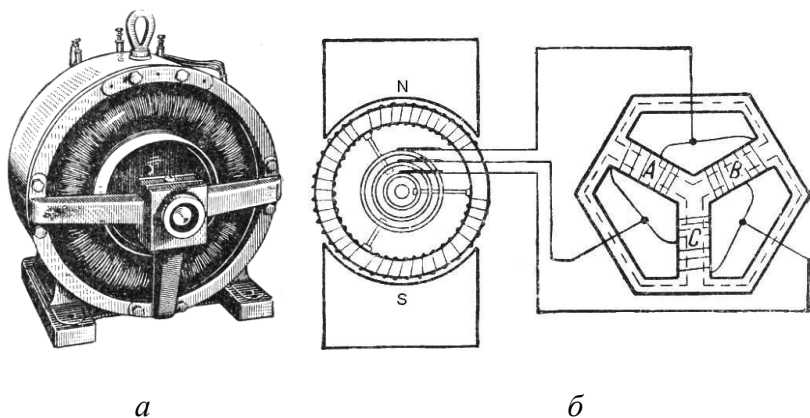


Рис. 78. Трифазний асинхронний двигун (а) і схема трифазного трансформатора (б)
М. Доливо-Добровольського (1890)

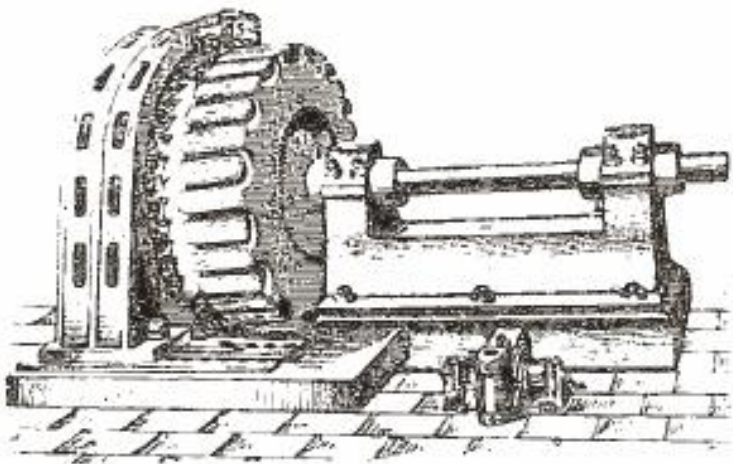


Рис. 79. Генератор трифазного струму М. Доливо-Добровольського (90ⁱ pp. XIX ст.)

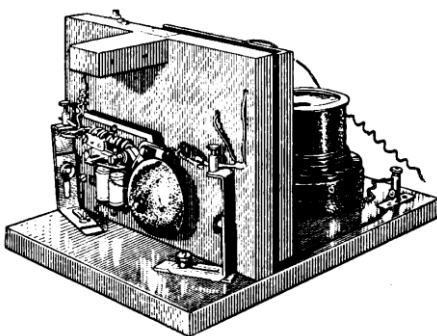


Рис. 80. Радіоприймач А. Попова (Росія, 1895)

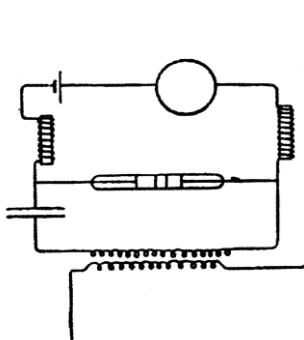


Рис. 81. Схема радіоприймача Г.М. Марконі (Італія, 1898)

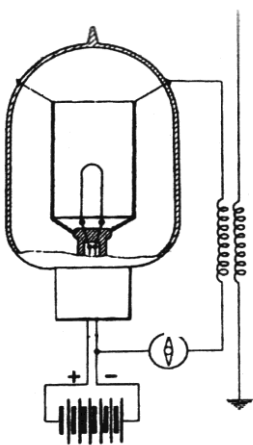


Рис. 82. Конструкція
двоелектронної лампи
Дж. Флемінга
(Великобританія, 1904)

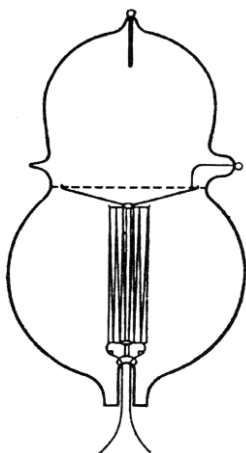


Рис. 83. Схема газорозрядного тріоду Р. фон Лібена
(Німеччина, 1910)

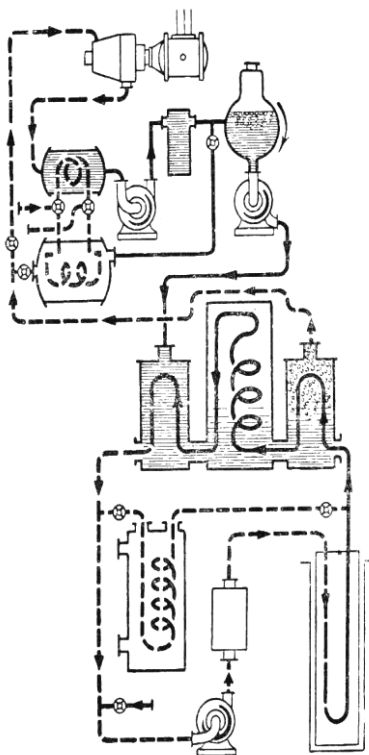


Рис. 84. Принципова схема
першої атомної електростанції
(СРСР, м. Обнінськ, 1954)

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. Панащевний Б.І., Свергун Ю.Ф. Загальна електротехніка. – К.: Каравела, 2003. – 438с.
6. Вартабелян В.А. Загальна електротехніка. – К.: Вища школа, 1993. – 182 с.
7. Вольтинский 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.....	2
Розділ 1. Чисельний експеримент	3
Розрахункова робота № 1. Розрахунок послідовного з'єднання резистора та котушки індуктивності...	3
Розрахункова робота № 2. Розрахунок послідовного з'єднання резистора та конденсатора без втрат.....	4
Розрахункова робота № 3. Розрахунок послідовного з'єднання резистора, котушки індуктивності.....	6
Розрахункова робота № 4. Розрахунок паралельного з'єднання резистора, конденсатора та котушки індуктивності.....	8
Розрахункова робота № 5. Розрахунок робочих характеристик електричних машин	11
Розділ 2. Фізичний експеримент.....	14
Лабораторна робота № 1. Вивчення рівнянь Кірхгофа в електричному колі постійного струму	14
Лабораторна робота № 2. Дослідження кола змінного струму при послідовному сполученні резистора та конденсатора.....	16
Лабораторна робота № 3. Дослідження кола змінного струму при послідовному сполученні резистора та котушки індуктивності.....	20
Лабораторна робота № 4. Дослідження кола змінного струму при послідовному з'єднанні резистора, конденсатора та котушки індуктивності.....	23
Лабораторна робота № 5. Дослідження кола змінного струму при послідовному з'єднанні резистора, конденсатора та котушки індуктивності.....	26
Лабораторна робота № 6. З'єднання зіркою трифазного електричного кола	29
Лабораторна робота № 7. З'єднання трикутником трифазного електричного кола.....	32

Лабораторна робота № 8. Ознайомлення з будовою та дослідження основних характеристик силового трансформатора.....	35
Лабораторна робота № 9. Ознайомлення з будовою та основними характеристиками асинхронного двигуна з фазним ротором	38
Лабораторна робота № 10. Ознайомлення з будовою та основними характеристиками генератора постійного струму.....	43
Лабораторна робота № 11. Ознайомлення з будовою та основними характеристиками шунтового двигуна постійного струму	48
Розділ 3. Основи електробезпеки та правила техніки безпеки.....	52
3.1. Основи електробезпеки.....	52
3.1.1. Дія електричного струму на організм людини.....	52
3.1.2. Фактори, які визначають ураження електричним струмом.....	54
3.1.3. Допустиме значення струму через людину.....	56
3.2. Загальні вимоги правил техніки безпеки.....	57
3.3. Спеціальні вимоги правил техніки безпеки.....	58
3.3.1. Заходи безпеки перед початком роботи....	58
3.3.2. Заходи безпеки під час виконання роботи..	59
3.3.3. Заходи безпеки після закінчення роботи...	60
3.4. Протипожежна безпека.....	60
3.5. Заходи долікарської допомоги під час нещасних випадків.....	61
3.5.1. Звільнення від електричного струму	61
3.5.2. Заходи першої допомоги потерпілому від електричного струму.....	62
3.5.3. Основні правила проведення штучного дихання та масажу серця.....	63
Додатки.....	65

Додаток 1. Допоміжні таблиці	65
Додаток 2. Приклади розв'язування типових рівнянь та зображення електричних величин.....	67
Додаток 3. Електровимірювальні прилади	76
Додаток 4. Сторінки історії електротехніки.....	86
Список літератури.....	110
Зміст.....	111