

Міністерство освіти і науки України

Львівський національний університет ветеринарної
медицини та біотехнологій імені С. З. Гжицького
Факультет харчових технологій та біотехнології
Кафедра загальнотехнічних дисциплін

Конспект лекцій з навчальної дисципліни

«Електротехніка з основами електроніки»

Розробив професор Ціж Б. Р.

Львів 2020

Лекція 1

Вступ. Електричні кола. Основні поняття.

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

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

На наших лекціях познайомимось із основними теоретичними відомостями про електричні та магнітні кола, а також електротехнічними пристроями і машинами, зокрема, вимірювальними приладами, трансформаторами, генераторами та двигунами.

Основні поняття електротехніки

Електричні явища зумовлюються наявністю електричних зарядів та електромагнітного поля.

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

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

цього заряду $\vec{\mathcal{E}} = \frac{\vec{F}}{q_0}$. Одиниця вимірювання напруженості електричного поля – **вольт на метр** [В/м].

Електрична напруга U – це фізична величина, що характеризує роботу електричного поля при переміщенні одиничного додатного заряду з однієї точки в іншу. $U = \frac{A}{q}$. Напруга ви-

значається різницею потенціалів між двома точками $U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2$.

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

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

Електричний струм I – спрямований рух носіїв електричного заряду, зумовлений наявністю ЕРС у замкненому контурі. Струм I визначає кількість зарядів q , що проходить за одну секунду через довільний перетин кола $I = \frac{q}{t}$ Одиниця вимірю-

вання струму – **ампер** [А]. Величина струму також визначається як $I = \frac{E}{R}$ чи $I = \frac{U}{R}$.

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

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

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

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

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

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

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

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

де ρ_0 – питомий опір провідного матеріалу при 0°C ; t – температура, $^\circ\text{C}$; α – температурний коефіцієнт опору, $1/^\circ\text{C}$.

Залежність опору провідних матеріалів від температури визначається виразом:

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

де t_1, t_2 – початкова та кінцева температури, $^\circ\text{C}$; R_1, R_2 – опори при температурах відповідно t_1, t_2 ; α – температурний коефіцієнт опору, $1/^\circ\text{C}$.

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

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

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

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 $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\text{Ом}\cdot\text{мм}^2\cdot\text{м}^{-1}$	Питома провідність γ , $\text{м}\cdot\text{Ом}^{-1}\cdot\text{мм}^{-2}$	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

Лекція 2

Лінійні електричні та магнітні кола постійного струму. Основні закони та властивості.

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

Електричне коло характеризується наявністю вузлів і віток (гілок).

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

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

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

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

За **першим законом Кірхгофа** алгебраїчна сума струмів у вузлі кола дорівнює нулеві:

$$\sum_{k=1}^n I_k = 0.$$

За **другим законом Кірхгофа** алгебраїчна сума ЕРС і напруг у замкненому контурі дорівнює нулеві:

$$\sum_{k=1}^n U_k, \quad E_k = 0.$$

Іншими словами алгебраїчна сума спадів напруг на всіх елементах замкненого контура дорівнює алгебраїчній сумі електрорушійних сил, що діють в цьому контурі:

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

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

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

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

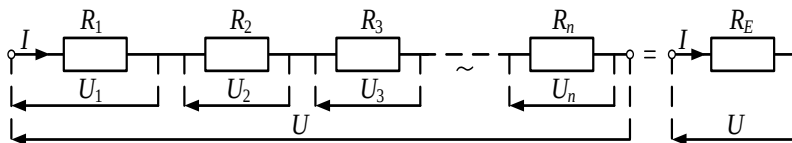


Рис.1. Послідовне з'єднання резисторів та їх еквівалента схема

При паралельному з'єднанні еквівалентна провідність дорівнює сумі провідностей віток

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

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

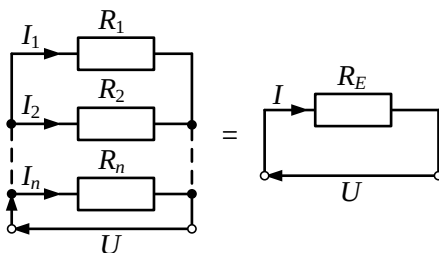


Рис.2. Паралельне з'єднання резисторів та їх еквівалентна схема

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Лекція 3

Лінійні електричні кола синусоїдального струму. Основні закони та властивості.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Еквівалентним за дією чи **діючим (ефективним)** значенням періодичного змінного струму називають струм, який віді-

ляє в елементі з опором R , за період часу T таку саму кількість теплової енергії, що й постійний струм. Діючі значення синусоїдних величин струму, напруги й ЕРС дорівнюють:

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

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

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

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

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

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

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

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

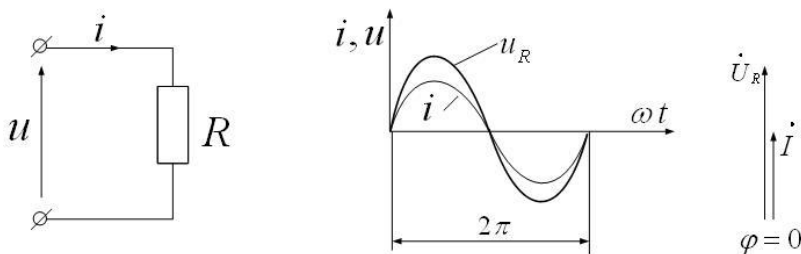


Рис.3. Резистор в колі синусоїдного струму, часові залежності, векторна діаграма

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

Котушка індуктивності – це елемент, який має властивість запасати енергію магнітного поля. **Ідеальна котушка** – це така котушка, резистивний опір якої дуже малий і ним можна знехтувати. В колі змінного струму опір індуктивності залежить від частоти струму $X_L = \omega L$. Величину X_L називають **реактивним індуктивним опором**, $[X_L] = 1 \text{ Ом}$. Напруга на котушці випереджає за фазою струм на 90° чи струм відстає від напруги на 90° , рис. 4. Кут зсуву фаз між напругою і струмом котушки індуктивності рівний: $\varphi = \psi_U - \psi_I = \frac{\pi}{2} - 0 = \frac{\pi}{2}$.

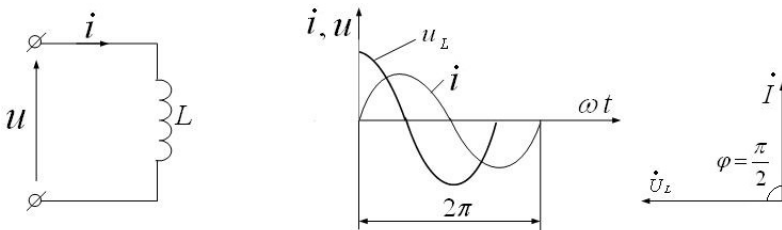


Рис. 4. Котушка індуктивності в колі синусоїдного струму, часо-
ві залежності, векторна діаграма

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

Конденсатор – це елемент, який запасає енергію електричного поля.

В колі змінного струму з конденсатором, на відміну від постійного, електричний струм проходить. Опір конденсатора струмові називається **реактивним ємнісним опором** і залежить від частоти струму

$$X_c = \frac{1}{\omega C} \cdot [X_c] = 1 \text{ Ом}.$$

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

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

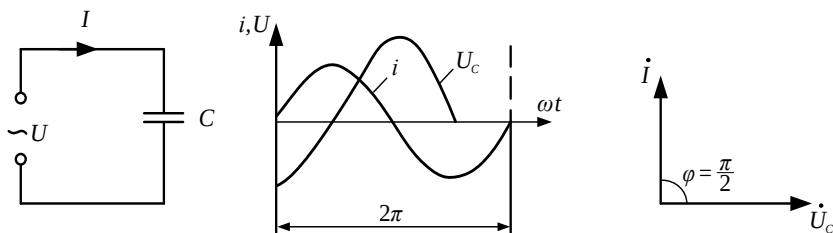


Рис.5. Конденсатор в колі синусоїдного струму, часові залежності, векторна діаграма

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

Якщо в колі з послідовно з'єднаними активним опором R , індуктивністю L та ємністю C (рис. 6) проходить синусоїдальний струм, то діюче значення напруги, прикладеної до кола, рівне:

$$U = \sqrt{U_R^2 + (U_L - U_C)^2}.$$

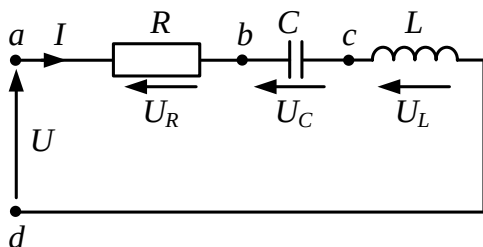


Рис.6. Послідовне з'єднання R , L , C

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

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

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

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

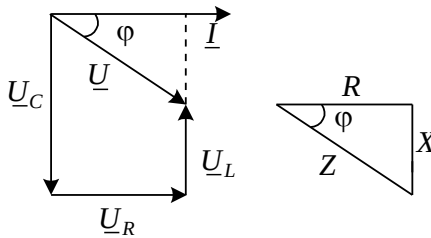


Рис.7. Векторна діаграма напруг та трикутник опорів

Кут зсуву фаз φ визначають за виразами:

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

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

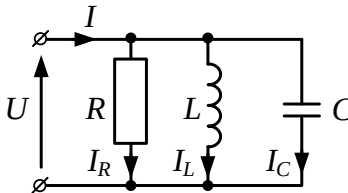


Рис.8. Паралельне з'єднання R, L, C

Діюче значення струму джерела рівне:

$$I = \sqrt{I_R^2 + (I_L - I_C)^2}.$$

Провідність вітки $Y = \frac{1}{Z}$ містить активну провідність $G = \frac{R}{Z^2}$ і реактивну провідність $B = \frac{X}{Z^2}$, які разом утворюють **трикутник провідностей**: $Y = \sqrt{G^2 + (B_L - B_C)^2} = \sqrt{G^2 + B^2}$, рис. 9. Тут $B = B_L - B_C$ – повна реактивна провідність.

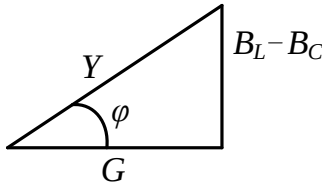


Рис. 9. Трикутник провідностей

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

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

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

повна – $S = UI = I^2 Z$ [ВА].

Потужності кола пов'язані між собою співвідношенням

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

і утворюють **трикутник потужностей**, рис.10.

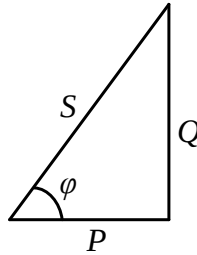


Рис.10.Трикутник потужностей

Важливою величиною є **коефіцієнт потужності**

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{R}{Z}.$$

Цей коефіцієнт вказує на ефективність використання електричної енергії, яка підводиться до споживача.

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

В колі чи ділянці електричного кола з послідовним з'єднанням котушки L та конденсатора C (рис. 6) за умови рівності їх опорів $X_L = X_C$ виникає явище **резонансу напруг**. Такі ділянки називаються **коливальними контурами** і характеризуються **кутовою резонансною частотою**, яка дорівнює

$$\omega_0 = 2\pi f = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

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

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

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

загасання контуру $d = \frac{1}{Q}$.

Ознаки резонансу напруг у колі змінного струму наступні:

1. Повний опір кола мінімальний і дорівнює активному опору $Z = R$.

2. Струм у колі максимальний, тому що повний опір кола мінімальний і рівний $I_0 = \frac{U}{R}$.

3. Струм у колі збігається за фазою з напругою мережі.

4. Напруга на індуктивному опорі дорівнює напрузі на ємності:

$$U_{L0} = U_{C0} = I_0 \cdot \rho = U \cdot Q = \frac{U}{d}.$$

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

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

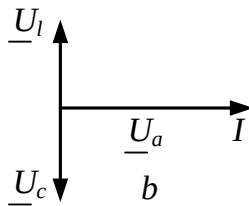


Рис.11. Векторна діаграма при резонансі напруг

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

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

Умовою резонансу є рівність $B_1 = B_2$, або в розгорнутій

формі:
$$\frac{\omega L}{R_1^2 + (\omega L)^2} = \frac{1}{\omega C} \frac{1}{R_2^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2} \quad \text{або} \quad \frac{X_L}{Z_1^2} = \frac{X_C}{Z_2^2}.$$

Кутова резонансна частота дорівнює

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

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

Опір паралельного контуру при резонансі:

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

Добротність контуру:

$$Q = \frac{\rho}{R_1 + R_2}.$$

Струм в нерозгалуженій ділянці кола при резонансі:

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

де R_i – внутрішній опір джерела енергії.

Якщо коло без втрат, тобто $R_1 = R_2 = 0$, то умова резонансу запишеться наступним чином:

$$\frac{1}{\omega_p L} = \omega_p C.$$

Кутова резонансна частота визначається як:

$$\omega_p = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

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

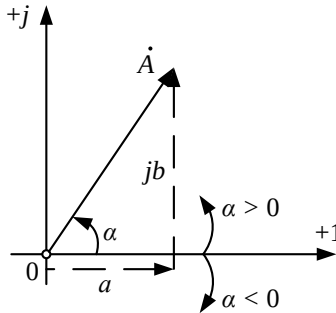
Потужність, що виділяється в паралельному коливальному контурі при резонансі буде рівною:

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

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.

3 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:



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**:

– алгебраїчна $\underline{A} = a + jb$;

– тригонометрична $\underline{A} = \underline{A}(\cos \alpha + j \sin \alpha)$;

– показникова $\underline{A} = A e^{j\alpha}$.

$a = A \cos \alpha$, $b = A \sin \alpha$ – 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 визна-

чення кута α треба враховувати, в якій чверті комплексної площини розташований вектор, а саме:

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

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

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

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:

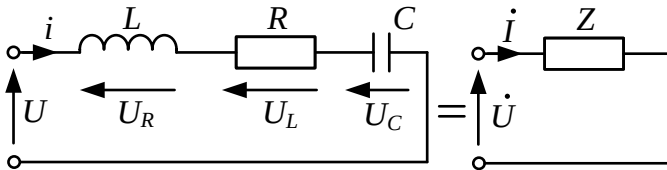
$$\underline{A} = \frac{\underline{A}_1}{\underline{A}_2} = \frac{\underline{A}_1 e^{j\alpha_1}}{\underline{A}_2 e^{j\alpha_2}} = \frac{\underline{A}}{\underline{A}_2} e^{j(\alpha_1 - \alpha_2)},$$

або в алгебраїчній формі:

$$\underline{A} = \frac{\underline{A}_1}{\underline{A}_2} \frac{a_1 a_2 - b_1 b_2}{a_2^2 + b_2^2} + j \frac{a_2 b_1 - a_1 b_2}{a_2^2 + b_2^2}.$$

Закон Ома в комплексній формі

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



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;

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

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

Підставляючи ці значення, одержимо:

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

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

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

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

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

$$\underline{Z} = \frac{\underline{U}}{\underline{I}} = \frac{U e^{j\psi_u}}{I e^{j\psi_i}} = \frac{U}{I} e^{j(\psi_u - \psi_i)} = Z e^{j\varphi} = Z \cos \varphi + j Z \sin \varphi = R + jX$$

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

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

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

Лекція 4

Трифазні електричні кола.

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

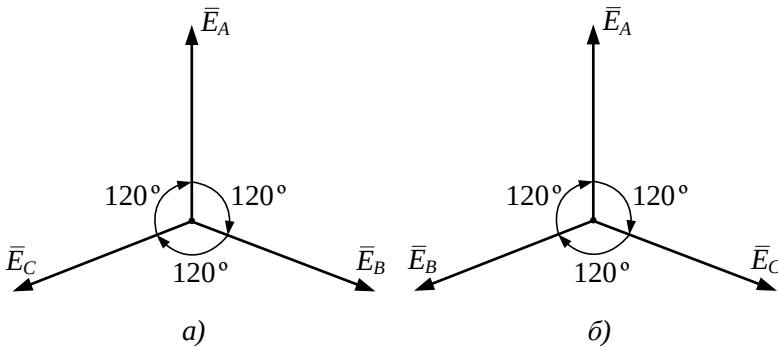


Рис. 12. Векторне відображення трифазної системи ЕРС з прямим чергуванням фаз (а) і зворотним чергуванням фаз (б)

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

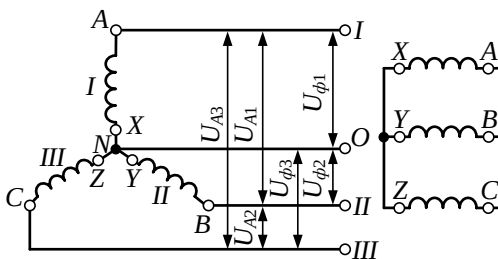


Рис. 13. З'єднання фаз генератора зіркою

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

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

Трифазний споживач називається **симетричним**, якщо однакові відповідно активні і реактивні опори його трьох фаз: $R_a = R_b = R_c = R_{\text{ф}}$, $X_a = X_b = X_c = X_{\text{ф}}$.

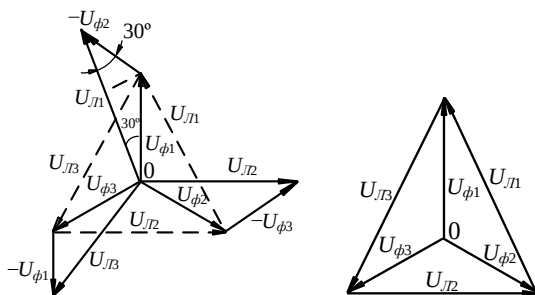


Рис. 14. Векторна діаграма напруг при з'єднанні фаз генератора зіркою

Струм у нульовому проводі у випадку симетричного навантаження дорівнює нулю.

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

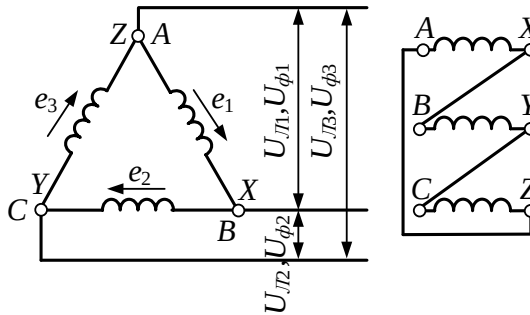


Рис. 15. З'єднання фаз генератора трикутником

В трифазному симетричному колі із з'єднанням фаз трикутником лінійний струм більший від фазного в $\sqrt{3}$ разів, а його початкова фаза відстає від початкової фази фазного струму на 30° , тобто $I_L = \sqrt{3}I_\phi$; $\psi_{iL} = \psi_{i\phi} - 30^\circ$, а лінійна і фазна напруги рівні $U_L = U_\phi$. Векторна діаграма напруг показана на рис. 16.

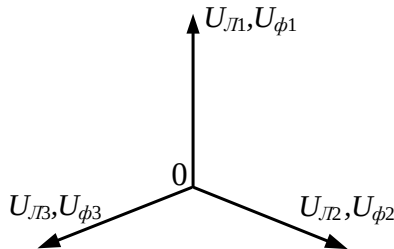


Рис. 16. Векторна діаграма напруг при з'єднанні фаз генератора трикутником.

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

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

Сумарні потужності трифазного споживача рівні:

$$P = 3P_\phi = 3 U_\phi I_\phi \cos \varphi,$$

$$Q = 3 Q_\phi = 3 U_\phi I_\phi \sin \varphi,$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = 3U_\phi I_\phi.$$

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

$$P = \sqrt{3}U_{\text{л}} I_{\text{л}} \cos \varphi; \quad Q = \sqrt{3}U_{\text{л}} I_{\text{л}} \sin \varphi; \quad S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{3}U_{\text{л}} I_{\text{л}}.$$

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

Лекція 5

Трансформатори. Електровимірювальні прилади

Трансформатори.

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

Трансформатори складаються із магнітопроводів і первинних та вторинних обмоток.

Частини магнітопроводу з обмотками називають **стержнями**, а частини магнітопроводу без обмоток – **ярмами**.

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

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

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

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

За призначенням розрізняють:

- **силові трансформатори**, які перетворюють значні потужності у сотні-тисячі та більше ВА
- **спеціальні трансформатори**, як правило малопотужні, що використовуються в схемах передачі та перетворення інформації (вимірювальні, узгоджувальні тощо).

Трансформатори бувають:

- **підвищувальні**, в яких вторинна напруга перевищує первинну $U_2 > U_1$,
- **знижувальні**, в яких первинна напруга перевищує вторинну $U_1 > U_2$.

Робота трансформаторів базується на законі електромагнітної індукції.

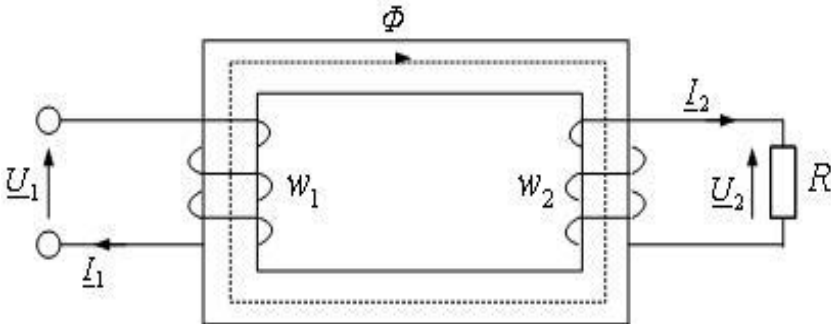


Рис.17. Схема однофазного трансформатора

Найважливішим параметром трансформатора є **коефіцієнт трансформації n** (або **k**), який дорівнює відношенню напруг вторинної обмотки до первинної при неробочому режимі, тобто при $I_2 = 0$ (або відношенню вторинної ЕРС до первинної, чи кількості витків вторинної обмотки до первинної):

$$n = \frac{E_2}{E_1} = \frac{w_2}{w_1} = \frac{U_2}{U_1}.$$

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

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

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

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

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

Зміну напруги у відсотках визначають за виразом:

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

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

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

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

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

Рівняння струмів для трансформатора має вигляд:

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

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

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

Номінальною потужністю трансформатора називають повну номінальну потужність $S_n = U_{1n} I_{1n}$, ВА.

Трансформатори можуть працювати в таких **режимах**:

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

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

$$\cos \varphi_{10} = \frac{P_{10}}{U_{1n} I_{10}}$$

і становить $\cos \varphi_{10} = 0,05...0,2$.

Режим короткого замикання трансформатора – це режим, в якому вторинну обвитку замкнено накоротко, а до первинної обвитки прикладено таку напругу U_{1k} , при якій в обвитках трансформатора проходять струми, які дорівнюють номінальним: $I_{1k} = I_{1n}$, $I_{2k} = I_{2n}$. Напругу U_{1k} називають **напругою короткого замикання**, і визначають у відсотках від номінальної напруги:

$U_k\% = \frac{U_{1k}}{U_n} \%$, яка становить (4...15) %.

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 неможли-

ві 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, сприйнятній для спостерігача.

Робота електровимірювальних приладів полягає в переміщенні їх рухомої частини, спричинюваному механічними зусиллями, що виникають у приладі внаслідок одного з проявів електричного струму (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 ÷ +35)°C, вологість 80 %,
- *група Б*: температура (–30 ÷ +40)°C, вологість 90 %,
- *група В1*: температура (–40 ÷ +50)°C, вологість 95 %,
- *група В2*: температура (–50 ÷ +50)°C, вологість 95 %,
- *група В*: температура (–50 ÷ +80)°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.

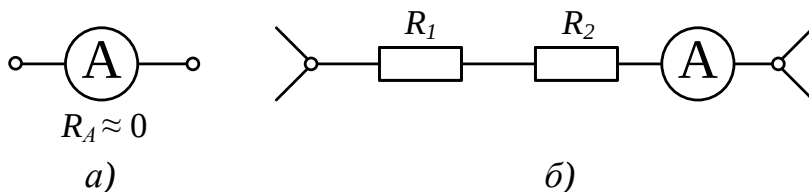


Схема ввімкнення амперметра

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.

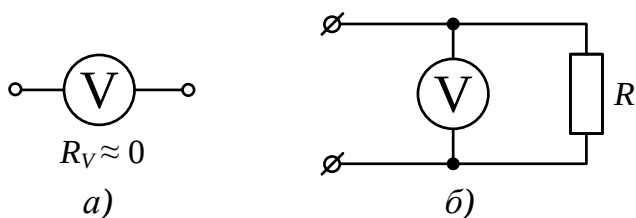


Схема ввімкнення вольтметра

Для вимірювання напруги постійного струму у вольтметрах застосовуються всі системи, крім індукційної, а для вимірювання напруги змінного струму – всі, крім магнітоелектричної. При вимірюванні високих напруг змінного струму використовуються вимірювальні трансформатори напруги, для яких приєднуються вольтметри.

Вимірювання потужності. Потужність постійного струму можна визначити як добуток напруги та струму: $P = UI$, тобто перемноживши покази вольтметра й амперметра, ввімкнених в коло. Цей метод вимірювання потужності називається **методом амперметра та вольтметра**.

Для вимірювання потужності існують спеціальні прилади, які називаються **ватметрами**. Потужність постійного струму вимірюється ватметрами електродинамічної системи, струмова обвитка яких вмикається послідовного, а напругова – паралельно до елемента.

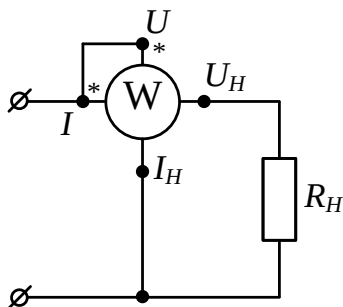


Схема ввімкнення ватметра.

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

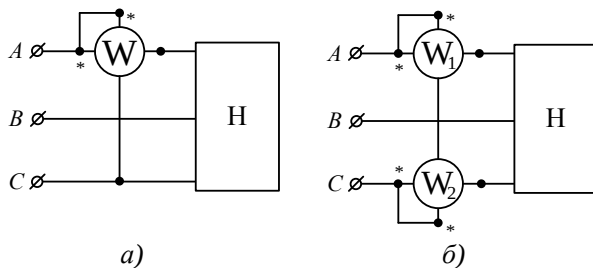
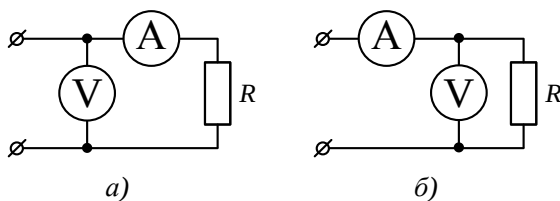


Схема ввімкнення ватметрів у трифазних колах



Схеми для вимірювання опору

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

Безпосереднім методом вимірювання опору є використання **омметра**. Прилад має набір додаткових опорів та сталу ЕРС, величину похибку і нерівномірну шкалу.

Для точнішого вимірювання використовують **мостовий метод**.

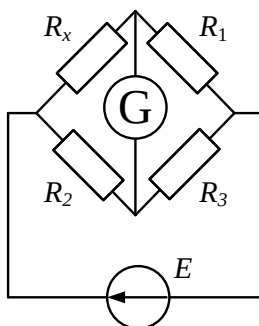


Рис. 56. Схема вимірювального моста

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, звіреним з еталоном. Помилка у вимірюванні називається *похибкою*.

Для характеристики точності вимірювальних приладів використовують поняття похибки, які кваліфікують: за способом виразу (абсолютні, відносні та приведені); за характером прояву (систематичні, випадкові, промахи); за умовами експлуатації.

Абсолютна похибка – це різниця між вимірюваним і дійсним значенням величини: $\Delta A = A_B - A_0$, де A_B – вимірювана величина; A_0 – дійсна величина, що виміряна точнішим приладом.

Відносна похибка – це відношення абсолютної похибки до вимірюваного значення у відсотках: $\delta = \frac{\Delta A}{A_B} 100\%$.

Приведена похибка – це відношення абсолютної похибки до номінального значення вимірювального приладу у відсотках:

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

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.

Лекція 6

Електричні машини постійного струму.

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

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

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

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

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

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

За **способом збудження** ЕМПС поділяються на:

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

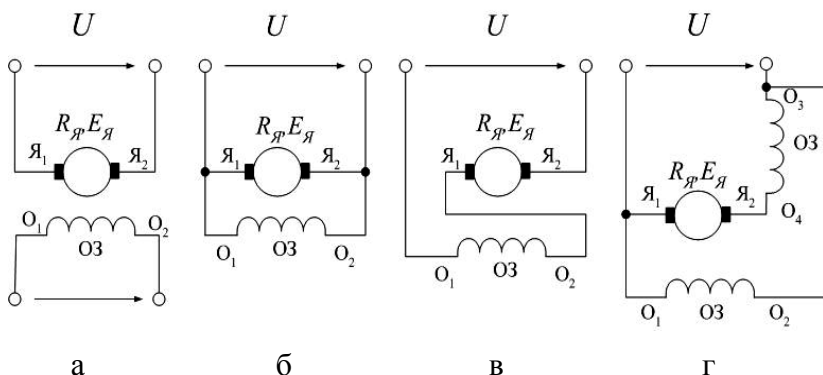


Рис. 18. Схеми способів збудження електричних машин постійного струму

ЕМПС із самозбудженням в свою чергу поділяються на машини:

- **паралельного збудження (шунтові)**, в яких обвитка збудження під'єднана паралельно до обвитки якоря (рис. 18б);
- **послідовного збудження (серієсні)**, в яких обмотка збудження під'єднана послідовно до обмоток якоря, тому в обмотці збудження і якорі тече однаковий струм $I = I_a = I_{зб}$ (рис. 18в);
- **змішаного збудження (компаундні)**, в яких є дві обмотки збудження: одна із них під'єднується послідовно до обвитки якоря, а друга – паралельно (рис. 18г).

ЕРС *генератора постійного струму* визначається за формулою:

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

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

Напруга на клеммах якоря генератора (Y_1, Y_2 на рис. 18) визначається за формулою:

$$U_Y = E - I_Y R_Y,$$

де E – ЕРС обвиток якоря; I_Y – струм якоря; R_Y – опір обвиток якоря.

Це рівняння називається *рівнянням генератора*.

Струм якоря в генераторах із самозбудженням:

$$I_Y = I + I_{зб},$$

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

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

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

Регульовальна характеристика – це залежність струму збудження від струму навантаження при незмінній частоті обертання ротора та незмінній напрузі навантаження, тобто $I_{зб} = f(I)$ при $n = const, U_c = const$.

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

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

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

Обертальний електромагнітний момент двигуна визначається за формулою:

$$M = C_m \Phi I_{\text{я}} = \frac{pN}{2\pi a} \Phi I_{\text{я}},$$

де C_m – конструктивна стала; Φ – магнітний потік; $I_{\text{я}}$ – струм якоря (обмотки якоря).

Рівняння напруг для двигуна має вигляд:

$$U = E + I_{\text{я}} R_{\text{я}}, \quad \text{де} \quad E_{\text{я}} = C_E \Phi n, \quad C_E = \frac{pN}{60a}.$$

Це рівняння називається **рівнянням двигуна**.

Частота обертання якоря двигуна:

$$n = \frac{U - I_{\text{я}} R_{\text{я}}}{C_E \Phi}.$$

Пусковий струм рівний:

$$I_{\text{яп}} = \frac{U}{R_{\text{я}} + R_{\text{п}}}.$$

Для обмеження пускового струму послідовно в коло якоря на час пуску вмикається пусковий реостат з опором $R_{\text{п}}$.

Опір пускового реостату рівний:

$$R_{\Pi} = \frac{U}{I_{я\Pi}} - R_{я},$$

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

Експлуатаційні властивості двигуна визначаються його **робочими характеристиками**, під якими розуміють залежності частоти обертання n , струму I , корисного моменту M_2 , обертового моменту M від потужності на валу двигуна P_2 , тобто $n, I, M_2, M = f(P_2)$ при $U, I_{3\phi} = const$.

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

Механічною характеристикою називають залежність $n = f(M)$ при $U = const, I_{3\phi} = const$.

Частоту обертання регулюють такими способами:

1. Введенням додаткового опору в коло якоря. Тоді час-

тота обертання буде рівна:
$$n = \frac{U - I_{я}(R_{я} + R_{д})}{C_E \Phi}.$$

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

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

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

До **двигуна** підводиться **електрична потужність** (енергія) $P_1 = U_{\phi} I$, а віддається **механічна потужність** (енергія)

$$P_2 = M_{об}\omega = \frac{2\pi n}{60} M_{об}.$$

Коефіцієнт корисної дії електричних машин постійного струму рівний:

- для генератора: $\eta = \frac{P_{2ген}}{P_1} = \frac{P_{2ген}}{P_{2ген} + \Delta P};$
- для двигуна: $\eta = \frac{P_{2двиг}}{P_1} = \frac{P_1 - \Delta P}{P_1},$

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

Лекція 7

Асинхронні та синхронні електричні машини.

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

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

На рис. 19 показана конструктивна схема асинхронного трифазного двигуна.

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

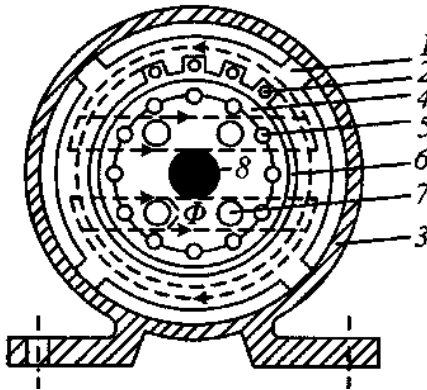


Рис. 19. Конструктивна схема асинхронного трифазного двигуна: 1 – осердя статора, набране із листів електротехнічної сталі; 2 – трифазна обмотка статора; 3 – корпус (станина) статора; 4 – осердя ротора, теж набране з листів електротехнічної сталі; 5 – обмотка ротора; 6 – повітряний проміжок між ротором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

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

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

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

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

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

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

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

Різниця частот обертання магнітного поля і ротора, віднесена до частоти обертання поля, називається **ковзанням**:

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} 100\%.$$

Ковзання характеризує ступінь відставання ротора відносно обертового магнітного поля.

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

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

Частоту струму обвитки ротора можна записати так:

$$f_2 = \frac{pn_s}{60} = \frac{p}{60}(n_1 - n_2) \frac{n_1}{n_1} = \frac{pn_1}{60} \frac{(n_1 - n_2)}{n_1} = sf_1,$$

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

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

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

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

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

Діюче значення ЕРС обвитки ротора під час його обертання $E_{2s} = E_2s$, де E_2 – ЕРС нерухомого ротора.

Відношення E_1 до E_2 для нерухомого ротора з розімкненою обвиткою ротора, так само, як у трансформаторі, називають **коефіцієнтом трансформації**:

$$n = \frac{E_1}{E_2} = \frac{W_1}{W_2} \frac{k_1}{k_2}.$$

Струм фазної обвитки ротора визначається за законом Ома:

$$I_2 = \frac{E_{2s}}{Z_2} = \frac{sE_2}{\sqrt{R_2^2 + X_{2s}^2}},$$

де R_2 – **активний опір** фазної обвитки ротора, X_{2s} – **реактивний індуктивний** опір фазної обвитки ротора, $X_{2s} = \omega_2 L_2 = 2\pi f_2 L_2 = 2\pi s f_1 L_2 = s X_2$, $X_{2s} = s X_2$, тобто **індуктивний опір** обертового ротора дорівнює індуктивному опору кола ротора в нерухомому стані, помноженому на ковзання.

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

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

Якщо асинхронний двигун працює при сталому ковзанні ($s = \text{const}$), тоді вираз для **обертового моменту двигуна** запишеться:

$$M = K U_1^2, \text{ де } K = C_M \frac{R_2/s}{(R_2/s)^2 + X_2^2},$$

тобто електромагнітний момент асинхронного двигуна пропорційний квадрату напруги живлення.

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

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

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

Кратність пускового моменту

$$K_M = \frac{M_{\Pi}}{M_{ном}},$$

де M_{Π} – пусковий момент двигуна.

Струм, який споживає двигун

$$I_1 = \frac{P_2}{m_1 \eta U_1 \cos \varphi_1}.$$

Коефіцієнт корисної дії асинхронного двигуна рівний:

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

де P_1 – потужність, яка споживається двигуном $P_1 = m_1 E_1 I_1 \cos \varphi_1$, m_1 – кількість фаз обвитки статора, P_2 – потужність на валу двигуна (корисна потужність) $P_2 = \Omega_2 M_2$, ΔP – сумарні втрати потужності.

Робочими характеристиками асинхронного двигуна називаються залежності споживаної потужності P_1 , лінійного

струму обвитки статора I_1 , коефіцієнта потужності $\cos\varphi$, моменту на валу M_2 , ковзання s і ККД η від корисної потужності на валу P_2 при роботі з номінальною напругою і частотою.

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

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

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

Складність регулювання частоти обертання асинхронних двигунів є їх основним недоліком. З виразу для частоти обер-

тання $n_2 = n_1(1-s) = \frac{60f}{p}(1-s)$ впливають три можливі **способи**

регулювання частоти асинхронного двигуна: зміною частоти струму, зміною кількості пар полюсів та зміною ковзання.

Лекція 8

Основи електробезпеки та правила техніки безпеки

Основи електробезпеки

Дія електричного струму на організм людини

Статистика електротравматизму свідчить, що смертельні ураження електричним струмом складають 2,7 % від загального числа смертельних нещасних випадків.

Види уражень електричним струмом. Виділяють два види уражень електричним струмом: електричні травми й електричні удари.

Електричні травми – це місцеві ураження тканин і органів електричним струмом: опіки, електричні знаки й електрометалізація шкіри.

Опіки можливі при проходженні через тіло людини значних струмів (більше 1 А). У цьому випадку струм нагріває поверхню тіла людини до температури 60 – 70 °С. В електроустановках напругою вище 1000 В опіки можуть виникати і без посереднього контакту з струмопровідними частинами, а лише при випадковому наближенні на небезпечну відстань. коли ця відстань дорівнює розрядній або менша, виникає спочатку іскровий розряд, який переходить в електричну дугу. Температура дуги досягає 4000 °С, і крім цього тканини тіла нагріваються струмом, який проходить через них.

Електричні знаки виникають безпосередньо при контакті зі струмопровідними частинами. Це припухлості із затверділою у вигляді мозоля шкірою жовтого або жовтувато-білого кольору, круглої чи овальної форми. Глибоке ураження живих тканин може призвести до порушення функцій ураження органу, хоч електричні знаки неболючі.

Електрометалізація шкіри – просочування поверхні шкіри частинками металів внаслідок їх випаровування і розбризкування під дією електричного струму, наприклад при горінні

дуги. Уражені ділянки шкіри стають жорсткими шерехатими і набувають кольору металу, 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).

Поріг невідпускаючого струму – це найменша величина струму, при котрій людина вже не може самотійно звільнитися від захоплених електродів через які протікає струм 6 – 10 мА. Струми меншої величини називають **відпускаючими**.

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.

Фактори, які визначають ураження електричним струмом

Індивідуальні особливості людини значною мірою визначають наслідок ураження. Струм, який викликає лише слабкі відчуття в однієї людини, може бути таким, що не відпускає для

іншої. Характер дії при одному і тому ж значенні струму залежить від стану нервової системи й всього організму вцілому. Важливим фактором, що визначає ступінь дії на людину електричного струму є її вага та фізичний розвиток. Для жінок порогове значення струму в 1,5 разів нижче, ніж для чоловіків.

Тривалість дії струму на організм людини. Чим вона менша, тим менші наслідки. При довгій дії струму опір людини зменшується і струм збільшується до значень, що можуть викликати параліч дихання і навіть фібриляцію серця. Зупинка дихання настає не миттєво, а через декілька секунд. Причому час зменшується зі збільшенням значення струму, що приходить через органи людини.

Шлях проходження струму в тілі людини також впливає на результат ураження: струм в тілі людини проходить не обов'язково по найкоротшому шляху, що пояснюється великою різницею питомих опорів різних тканин. Найнебезпечніше для здоров'я людини проходження струму через серце і дихальні шляхи. Найменший струм через серце проходить по шляху замикання струму через нижню петлю нога-нога, під дією так званої «крокової напруги». Якщо струм достатньо великий, він викликає судороги ніг, людина падає, після чого струм вже може проходити через грудну клітку, тобто через дихальні органи і серце.

Вид і частота струму. Встановлено, що змінний струм частотою 50 – 60 Гц небезпечніший, ніж постійний. Однак навіть невеликий постійний струм нижче порогу відчуття при швидкому розриві кола викликає різкі болі, інколи судороги м'язів рук. Небезпека дії струму 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.

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 відпу-

скається, при цьорму людина не в стані самостійно звільнитися. Тому не допустимо, щоб через людину будь-який час проходив струм, більший від допустимого. Згідно з таблиці 1, за найбільший довготривалий струм через людину при випадковому потрібно приймати поріг струму, що відпускає, який дорівнює 10 мА.

Якщо людина в процесі роботи має контакт з частинами, які знаходяться під напругою, довготривалий струм необхідно приймати не більше за 5 мА. **Довготривалий допустимий струм $I_{d.d.} = 10$ мА.** Як короточасні 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 короточасних 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	$U_{d.o.m}, B$	500	250	100	75	50	36	36	12
Напруга від 1 до 35 кВ при ізольованій нейтралі	I_h, mA	500	250	100	75	50	6	6	6
Постійний струм	$U_{d.o.m}, B$	500	400	250	200	150	100	100	50
	I_h, mA	500	400	200	150	150	50	50	25

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, неприпинятих 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.

Спеціальні вимоги правил техніки безпеки

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.

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.

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.

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.

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.

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 на-

лежних заходів безпеки, небезпечне для життя того, що надає допомогу. Тому той, хто надає допомогу, повинен швидко вимкнути ту частину установки, до якої доторкається потерпілий.

3. Для відокремлення потерпілого від струмопровідних частин чи провідника належить скористуватися сухим одягом, канатом, палкою, дошкою чи будь-яким іншим предметом, що не проводить електричного струму. Для відокремлення потерпілого від струмопровідних частин можна також взятися за його одяг (якщо він сухий і відстає від тіла), наприклад, за поли блузи, уникаючи при цьому доторкання до оточуючих металічних предметів і частин тіла, не прикритих одягом.

4. Для ізоляції рук, той, хто надає допомогу, повинен надягнути діелектричні рукавиці чи обмотати обидві руки шарфом, надягнути на руки суконну кепку, опустити на руки рукав блузи чи пальто, використати прорезинену тканину чи просто суху матерію. Можна також використати предмети, які не проводять електричний струм (суху дошку, килимок тощо).

5. Під час відокремлення потерпілого від струмопровідних частин рекомендується діяти по можливості однією рукою. Після звільнення від дії електричного струму необхідно негайно викликати лікаря і надати потерпілому першу допомогу.

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.

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 валик 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.

Список літератури

1. Бобало Ю. Я., Мандзій Б. А., Стахів П. Г. та ін. Основи теорії електронних кіл.. – Львів: В-во НУ „Львівська політехніка”, 2008. – 330 с.
2. Коруд В. І., Гамола О. Є., Малинівський С. М. Електротехніка. – Львів: «Магнолія 2006», 2007. – 446 с.
3. Малинівський С. М. Загальна електротехніка. – Львів: В-во НУ „Львівська політехніка”, 2003. – 596 с.
4. Титаренко М. В. Електротехніка К.: Кандор, 2004. – 240 с.
5. Паначевний Б. І., Свергун Ю. Ф. Загальна електротехніка. – К.: Каравела, 2003. – 438с.
6. Вартабелян В. А. Загальна електротехніка. – К.: Вища школа, 1993. – 182 с.
7. Волынский Б. А., Зейн Е. Н., Шатерников В. Е. Электротехника. – М.: Элетроатомиздат, 1987. – 526 с.
8. Кутунович Ф. Г. Электротехника. – М.: Высшая школа, 1999. – 400 с.
9. Касаткин А. С., Немцов М. В. Электротехника. – М.: Высшая школа, 2000. – 542 с.
10. Збірник задач з теоретичної електротехніки / за ред. А. Ю. Воробкевича, О. І. Шегедина. – Львів: Магнолія, 2004. – 224с.
11. Березкина Т. Ф., Гусев Н. Г., Масленников В. В. Задачник по общей электротехнике с основами электроники. – М.: Высшая школа, 1991. – 384 с.
12. Ціж Б. Електротехніка. – Львів: В-во ЛНУВМ та БТ ім. С. З. Гжицького, 2008. – 110 с.
13. Методичні настанови та інструкції до лабораторних робіт з загальної електротехніки. – Львів: В-во НУ „Львівська політехніка”, 1998. – 38 с.
14. Методичні настанови до виконання лабораторного практикуму з електротехніки. – Львів: ЛНАВМ ім. С. З. Гжицького, 2005. – 34 с.