

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 для виконання самостійної роботи
з навчальної дисципліни
«Електротехніка з основами електроніки»

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

Львів 2020

Відповідно до робочої програми навчальної дисципліни «Електротехніка з основами електроніки» на самостійне вивчення виносяться наступні теми:

Тема 1. Трифазні електричні кола. Взаємне перетворення зірки і трикутника опорів в електричному колі постійного струму. Розподіл потенціалу в електричному колі.

Тема 2. Електричні вимірювання та прилади. Класифікація та основні характеристики засобів вимірювання. Особливості вимірювання струмів, напруг, потужностей, опорів. Вимірювання неелектричних величин. Магнітоелектричні, електромагнітні, електродинамічні та індукційні системи вимірювальних механізмів аналогових приладів. Цифрові вимірювальні прилади.

Тема 3. Електричні машини постійного струму Класифікація та основні характеристики генераторів і двигунів постійного струму. Структурно-логічні схеми генератора і двигуна постійного струму.

Тема 4. Основи електроприводу та його апаратури. Загальні поняття. Вибір електродвигунів. Апаратура для керування електроприводом і захисту електродвигунів. Автоматизація керування електроприводом.

Тема 5. Електропостачання та електроощадність. Виробництво, пересилання і розподіл електроенергії. Джерела електричної енергії. Трансформаторні підстанції. Схеми електропостачання. Заземлення і занулення. Захист від блискавки.

В даних методичних вказівках детально висвітлений теоретичний і практичний матеріал за цими темами.

Тема 1. Трифазні електричні кола

Після вивчення даної теми

Ви повинні знати:

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

Ви повинні вміти:

1. Визначати та вимірювати фазні та лінійні струми та напруги.
2. Аналізувати симетричні трифазні кола при з'єднанні навантаження зіркою та трикутником.

Основні теоретичні відомості

Трифазна система ЕРС – це три синусоїдні ЕРС однакової частоти, зсунені за фазою одна відносно іншої на кут 120° і вироблених одним джерелом. Частину багатофазного кола, в якій діє одна з ЕРС, називають *фазою*. Тому окремі обвитки генератора називають фазними обвитками чи фазами генератора. Система трифазних ЕРС називається *симетричною*, якщо ЕРС кожної з фаз мають однакові амплітуди і зсунені в часі на 120° . Векторне відображення трифазної системи показано на рис. 1.

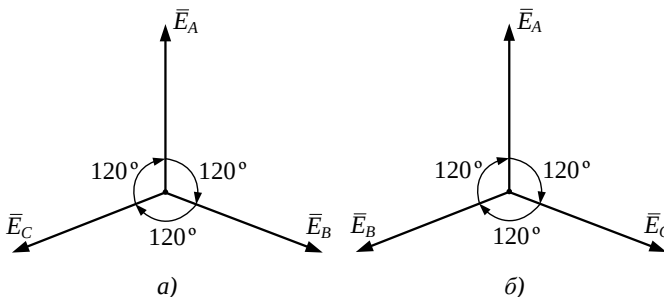


Рис. 1. Векторне відображення трифазної системи ЕРС з прямим чергуванням фаз (а) і зворотним чергуванням фаз (б)

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. 2), передбачає, що кінці фаз генератора (споживача) об'єднуються в один вузол N , який називають *нейтральною точкою* або просто *нейтраллю*.

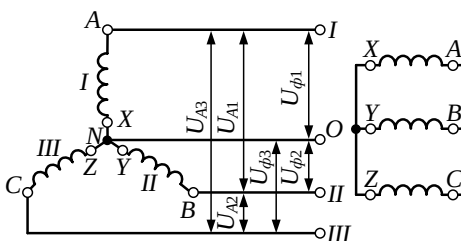


Рис. 2. З'єднання фаз генератора зіркою

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 $U_{\text{л}} = \sqrt{3}U_{\text{ф}}$; $\psi_{u/l} = \psi_{u/\phi} + 30^\circ$, а струми лінійний і фазний рівні $I_{\text{л}} = I_{\text{ф}}$. Векторна діаграма напруг показана на рис. 3.

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

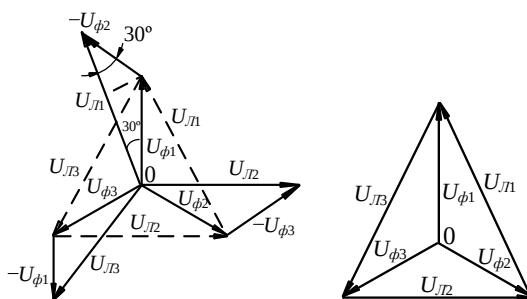


Рис. 3. Векторна діаграма напруг при з'єднанні фаз генератора зіркою

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. 4).

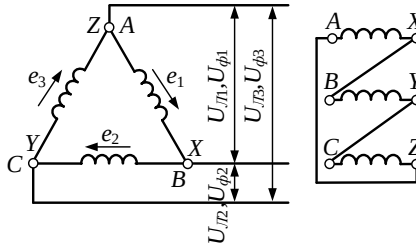


Рис. 4. З'єднання фаз генератора трикутником

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 $I_{\text{л}} = \sqrt{3}I_{\text{ф}}$; $\psi_{\text{ил}} = \psi_{\text{иф}} - 30^\circ$, а лінійна і фазна напруги рівні $U_{\text{л}} = U_{\text{ф}}$. Векторна діаграма напруг показана на рис. 5.

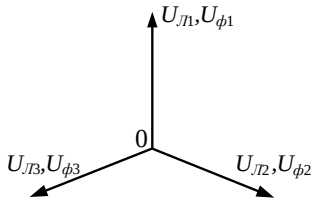


Рис. 5. Векторна діаграма напруг при з'єднанні фаз генератора трикутником.

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

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

Сумарні потужності трифазного споживача рівні:

$$P = 3P_{\text{ф}} = 3 U_{\text{ф}} I_{\text{ф}} \cos \varphi,$$

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

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

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

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

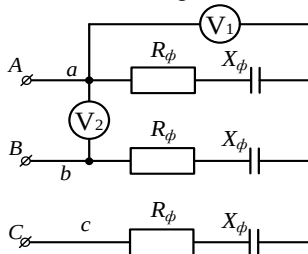
При незмінній напрузі живлення та незмінному опорі фаз навантаження потужність при з'єднанні трикутником в три рази більша ніж при з'єднанні зіркою: $P_\Delta = 3P$.

Приклади розв'язування задач

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

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

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



Розв'язок. Як видно зі схеми, навантаження симетричне, оскільки в кожній з фаз увімкнено однаковий активний і реактивний опори. У випадку з'єднання фаз зіркою і симетричному навантаженні лі-

нійна напруга більша, ніж фазна в $\sqrt{3}$. Оскільки вольтметр $V1$ увімкнено на фазну напругу U_a , а вольтметр $V2$ – на лінійну U_{AB} , то показ вольтметра $V2$ дорівнює $U_l = \sqrt{3}U_\phi = 60\sqrt{3} = 103,9 \text{ В}$.

Приклад 3. До джерела трифазної системи з лінійною напругою $U_l = 380 \text{ В}$ і частотою $f = 50 \text{ Гц}$ під'єднане рівномірне навантаження, яке увімкнене за схемою зірка, з повним опором у фазі $Z_\phi = 90 \text{ Ом}$ та індуктивністю $L = 180 \text{ мГн}$. Визначити активну, реактивну і повну потужність, коефіцієнт потужності, діюче значення лінійного струму і напруги.

Розв'язок.

Фазна напруга рівна: $U_\phi = \frac{U_l}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220 \text{ В}$.

Фазний струм рівний: $I_\phi = \frac{U_\phi}{Z} = \frac{220}{90} = 2,45 \text{ А}$.

Лінійний струм при з'єднанні зіркою рівний фазному:

$$I_l = I_\phi = 2,45 \text{ А}.$$

Реактивний опір у фазі:

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

Активний опір у фазі:

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

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

Потужність, яку споживає навантаження:

– активна $P_\phi = 3U_\phi I_\phi \cos \varphi = 3 \cdot 220 \cdot 2,45 \cdot 0,778 = 1258 \text{ Вт} \approx 1,26 \text{ кВт}$,

або $P = \sqrt{3}U_l I_l \cos \varphi \approx 1,26 \text{ кВт}$;

– реактивна $Q = 3U_\phi I_\phi \sin \varphi = 3 \cdot 220 \cdot 2,45 \cdot 0,628 = 1015 \text{ вар} \approx 1,015 \text{ квар}$,

або $Q = \sqrt{3}U_l I_l \sin \varphi \approx 1,0 \text{ квар}$;

– повна $S = 3U_\phi I_\phi = 3 \cdot 220 \cdot 2,45 = 1617 \text{ ВА} \approx 1,6 \text{ кВА}$,

або $S = \sqrt{3}U_l I_l = 1,73 \cdot 380 \cdot 2,45 \approx 1,6 \text{ кВА}$.

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

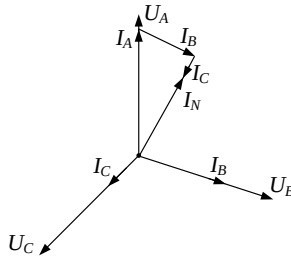
Розв'язок. Напруга в кожній фазі рівна:

$$U_\phi = \frac{U_L}{\sqrt{3}} = \frac{220}{\sqrt{3}} = 127\text{ В}.$$

$$\text{Струми у фазах рівні: } I_A = \frac{P_A}{U_\phi} = \frac{3000}{127} = 22,4\text{ А},$$

$$I_B = \frac{P_B}{U_\phi} = \frac{1800}{127} = 14,2\text{ А}, \quad I_C = \frac{P_C}{U_\phi} = \frac{600}{127} = 4,7\text{ А}.$$

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



$$\bar{I}_N = \bar{I}_A + \bar{I}_B + \bar{I}_C; \quad \bar{I}_N = 16\text{ А}.$$

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

Розв'язок. Фазна напруга $U_\phi = \frac{U_L}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220 \text{ В}$.

Повний опір у фазі A буде рівний:

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

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

у фазі C :

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

зні струми будуть рівні: $I_A = \frac{U_\phi}{Z_A} = \frac{220}{98} = 2,25 \text{ А};$

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

Активна потужність буде рівною:

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

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

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

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

Реактивна потужність буде рівною:

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

у фазі B $Q_B = 0;$

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

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

Повна потужність навантаження буде рівною:

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

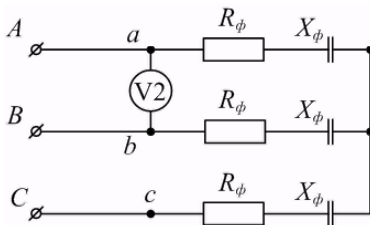
Задачі для самостійного розв'язування

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

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

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

Задача 4. Визначити фазний струм у схемі, зображеній на рисунку, якщо показ вольтметра V2 дорівнює 150 В, а параметри навантаження $R_\phi = 12$ Ом, $X_\phi = 18$ Ом.



Відповідь: 4 А.

Задача 5. В трифазному колі фази споживача з'єднано трикутником. Амперметр у фазі A показує 7 А. Визначити діюче значення струму у лінійному проводі B , якщо навантаження симетричне. **Відповідь:** 12,1 А.

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

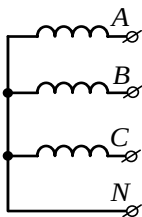
Задача 7. У трифазного споживача фази з'єднано трикутником і навантаження симетричне: $R_\phi = 9 \text{ Ом}$, $X_\phi = 15 \text{ Ом}$. Записати миттєве значення струму у лінійному проводі A , якщо лінійна напруга $U_\lambda = 380 \text{ В}$.

Задача 8. Визначити потужність симетричного трифазного споживача, фази якого з'єднано зіркою, якщо лінійна напруга джерела $U_\lambda = 220 \text{ В}$, $R_\phi = 16 \text{ Ом}$, $X_\phi = 20 \text{ Ом}$.

Відповідь: 1202 Вт.

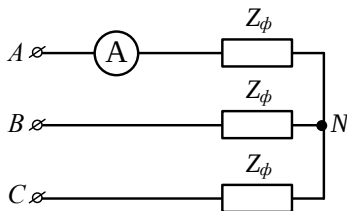
Задача 9. Фази симетричного трифазного споживача з'єднано трикутником. Повний опір фази споживача $Z_\phi = 20 \text{ Ом}$, коефіцієнт потужності $\cos \varphi = 0,8$. Визначити потужність, яку споживає цей споживач від джерела енергії з лінійною напругою $U_\lambda = 220 \text{ В}$. **Відповідь:** 5808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

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



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

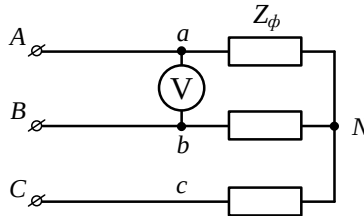
Задача 11. На рисунку зображено трифазний симетричний споживач електроенергії, фази якого з'єднано зіркою. Показ амперметра дорівнює $I = 3 \text{ А}$. Визначити показ амперметра, якщо фази даного споживача з'єднати трикутником при незмінній напрузі.



Відповідь: 9 А.

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

Задача 13. В симетричному трифазному колі, зображеному на рисунку, обчислити показ вольтметра, якщо відомо, що $I_C = 4 \text{ А}$, $Z_\phi = 10 \text{ Ом}$.



Відповідь: 69,2 В.

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

Задача 15. В симетричному трифазному колі лінійний струм $I_L = 14,5 \text{ А}$. Обчислити активну потужність, яку споживає навантаження, з'єднане трикутником, якщо $R_\phi = 8 \text{ Ом}$, $X_\phi = 6 \text{ Ом}$. **Відповідь: 1686 Вт.**

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

Задача 17. До трифазного симетричного приймача з'єданого трикутником підведена напруга $U = 220 \text{ В}$. Опори фаз $Z_\phi = R_\phi = 220 \text{ Ом}$. Визначити усі струми при симетричному режимі та при обриві лінійного проводу фази А.

Задача 18. Відомий струм фази $I_{AB} = 4 \text{ А}$, та опір фази $R_\phi = 55 \text{ Ом}$ симетричного трифазного приймача з'єданого трикутником. Визначити усі струми, напруги при симетричному режимі та при обриві фази ВС.

Задача 19. В симетричному трифазному колі лінійний струм $I_L = 14,5$ А. Обчислити активну потужність, яку споживає навантаження, з'єднане трикутником, якщо $R_\phi = 6$ Ом, $Z_\phi = 8$ Ом.

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

Задача 21. До трифазного симетричного приймача з'єданого трикутником підведена напруга $U_L = 220$ В. Опори фаз $R_\phi = 40$ Ом, $Z_\phi = 30$ Ом. Визначити усі струми при обриві фази АВ та при симетричному режимі, активну потужність споживача.

Задача 22. Три резистори з опором $R = 125$ Ом з'єднані за схемою зірка і увімкнені в трифазну чотирипровідну мережу. Струм в кожній фазі $I = 880$ мА. Визначити діюче значення фазної і лінійної напруги та лінійного струму, а також повну потужність, яку споживає навантаження.

Відповідь: 110 В, 190,5 В, 0,88 А, 290,4 Вт.

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

Задача 24. Три індуктивні котушки з активним опором $R = 34,2$ Ом та індуктивним опором $X_L = 23,5$ Ом з'єднані за схемою зірка і під'єднані до джерела трифазної напруги. Активна потужність у фазі $P_\phi = 1,6$ кВт. Визначити діюче значення лінійної і фазної напруги, струму у фазі, повну і реактивну потужності навантаження.

Відповідь: 488 В, 282 В, 6,8 А, 5,75 кВА, 3,25 квар.

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

повний і активний опір навантаження, його індуктивність, а також повну споживану потужність.

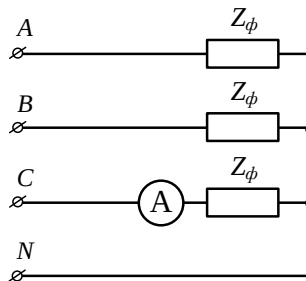
Відповідь: 1796 Ом, 80,5 Ом, 0,5 Гн, 825 ВА.

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

Задача 27. Відомі опори фаз $R_\phi = 6 \text{ Ом}$, $Z_\phi = 8 \text{ Ом}$ симетричного приймача з'єданого зіркою з нульовим проводом. Підведена лінійна напруга $U_L = 380 \text{ В}$. Відбулося від'єднання фази B . Визначити усі струми, а також активну і повну потужності приймача.

Задача 28. Відомі опори симетричного трифазного приймача фаз $R_\phi = 40 \text{ Ом}$, $X_\phi = 30 \text{ Ом}$, з'єданого трикутником. Підведена лінійна напруга $U_L = 220 \text{ В}$. Визначити усі фазні та лінійні струми, активну потужність окремих фаз та реактивну потужність трифазного приймача.

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



Запитання для самоперевірки

1. Особливості трифазної системи.
2. Види з'єднань фаз в трифазних колах.
3. Умова симетричного навантаження.

4. Співвідношення між фазними та лінійними величинами при з'єднанні зіркою.
5. Співвідношення між фазними та лінійними величинами при з'єднанні трикутником.
6. Вирази для визначення потужностей трифазного симетричного кола.
7. Призначення нульового проводу і випадки, коли його наявність є недоцільною.

Тема 2. Електричні вимірювання та прилади

Класифікація і основні характеристики засобів вимірювання

Вимірюванням називається знаходження значення невідомої величини в прийнятих одиницях дослідним шляхом.

Електровимірювальним приладом називається засіб електричних вимірювань, призначений для вироблення сигналу вимірювальної інформації в формі доступній для сприйняття (надалі просто прилад).

Прилади, покази яких є неперервною функцією вимірювальних величин називаються **аналоговими** (стрілковими).

Прилади, які автоматично виробляють дискретні сигнали вимірювальної інформації називаються **цифровими**.

Головна різниця між аналоговими і цифровими вимірювальними приладами полягає в індикації вимірювальної інформації. В аналогових видно безмежно близькі між собою значення результату, а в цифрових – тільки фіксовані значення результату, які є кроком квантування, створеним аналого-цифровим перетворювачем.

Всі електровимірювальні прилади класифікуються за такими ознаками: рід вимірювальної величини, рід струму, ступінь точності, принцип дії, ступінь оцінки.

1. За родом вимірювальної величини існує наступна класифікація: електричний струм вимірюють амперметрами (мілі-, мікро-, наноамперметрами), напругу – вольтметрами, потужність – ватметрами, електричну енергію – лічильниками кіловат-годин, опір – омметрами, зсув фаз – фазометрами, частоту – частотомірами.

2. За родом струму прийнятий поділ на три групи: 1) прилади, що вимірюють тільки постійний струм; 2) прилади, що вимірюють тільки змінний струм; 3) прилади, що вимірюють і постійний і змінний струм.

3. За ступенем точності є класи приладів, що позначаються наступними цифрами: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0; 5,0. Цифри стосуються основної зведеної похибки.

4. За принципом дії електровимірювальні прилади поділяються на: магнітоелектричні, електромагнітні, електродинамічні, індукційні, термоелектричні, детекторні, електронні, електростатичні, електролітичні, фотоелектричні. Найпоширенішими є перші чотири.

5. За способом оцінки (методом вимірювання) розділяють прилади безпосередньої оцінки і прилади порівняння. В перших безпосередньо вимірюється шукана величина, в других – шукана величина порівнюється з відомою.

Основними характеристиками електровимірювальних приладів є діапазон вимірювань, чутливість, поріг чутливості, споживна потужність, похибки.

Діапазон вимірювань – це область значень вимірювальної величини X , для якої нормовані допустимі похибки. Він обмежений межами вимірювань – найбільшим і найменшим значенням діапазону.

Чутливість S аналогового електровимірювального приладу називається похідна від переміщення показника по вимірювальній величині X . Якщо переміщення показника кутове, то похідну беруть від кута відхилення: Якщо $F(x)=const$, то шкала рівномірна, в протилежному разі – нерівномірна.

Поріг чутливості – це найменша зміна вимірювальної величини X , здатна викликати видиму зміну показів приладу.

Споживна потужність – це потужність, яка затрачається на живлення приладу. Чим менша споживана потужність тим вища якість приладу, бо, по-перше, затрачається менше енергії, а, по-друге, не порушується режим кола.

Похибка вимірювань характеризує відхилення результату від істинного значення вимірювальної величини.

Вимірювальні механізми аналогових приладів

1. Прилади магнітоелектричної системи.

Принцип дії **магнітоелектричного** вимірювального механізму базується на взаємодії постійного магнітного поля і провідника з постійним струмом. В магнітному полі постійного магніту поміщений рухомий циліндр з обмоткою. Циліндр і обмотка кріпляться на осі із вказівною стрілкою. Спіральними пружинами і балансирами фіксують вісь в початковому положенні, тобто нулі шкали. Вимірювальний струм проходить через обмотку і за законом Ампера взаємодіє з магнітом, внаслідок чого утворюється пара сил (обертний момент), яка прагне повернути обмотку до врівноваження сил взаємодії, і, таким чином, **кут α повороту стрілки пропорційний силі струму**, тобто $\alpha = kI$. Пружини врівноважують цей поворот, а при $I = 0$ повертають рамку і стрілку в початкове положення. В кожному приладі передбачений коректор нуля.

Для змінного струму така система не придатна, бо рухома частина через інерцію не встигає за змінами напрямку струму, і залишається нерухомою. Але для постійного струму такі прилади дуже точні, чутливі і економічні. В **логометрах** замість пружин використовують додаткові обмотки.

2. Прилади електромагнітної системи.

Принцип роботи **електромагнітного** вимірювального механізму ґрунтується на дії магнітного поля нерухомої котушки, через обмотку якої тече вимірювальний струм на сердечник з віссю і стрілкою. Для встановлення нуля і заспокоєння рухомої частини використовують відповідні пружини, а також повітряний заспокоювач. Чим більший вимірювальний струм, тим більше магнітне поле котушки, а отже і сила повороту стрілки. Пригадаємо з фізики, що енергія магнітного поля котушки рівна $\frac{1}{2}LI^2$ а тому сила втягування пропорційна I^2 . Отже ***кут повороту вимірювальної стрілки пропорційний квадрату сили струму.***

Приладами електромагнітної системи можна вимірювати і постійний і змінний струм, бо при зміні напрямку струму магнітні полюси сердечника міняються місцями (відбувається перемагнічування), і він продовжує втягуватись в котушку. Дані прилади менш точні за попередні, зате стійкіші до великих струмів і перевантажень.

3. Прилади електродинамічної системи.

Прилади даної системи позначаються символами $\square$, $\square$. Принцип дії **електродинамічного** вимірювального механізму ґрунтується на взаємодії магнітних полів котушок із струмами. Нерухома котушка розділена на дві послідовно з'єднані частини, між якими кріпиться на осі із стрілкою рухома котушка. Коли по обмотках котушок тече струм (чи однаковий, чи різний), їхні магнітні поля взаємодіють, утворюючи обертальний момент пропорційний добутку струмів двох котушок, і котушка 2 починає обертатись. Таким чином ***кут повороту стрілки приладу пропорційний I_1I_2 .*** Як і в попередніх приладах, пружини і камера та крило повітряного заспокоювача врівноважують стрілку.

Прилади даної системи придатні для вимірювання як постійного, так і змінного струму, бо при одночасній зміні напрямку струму, напрям обертального моменту не змінюється.

4. Прилади індукційної системи.

Індукційні механізми використовують тільки в колах змінного струму, найчастіше в лічильниках електроенергії і ватметрах.

Принцип дії індукційного механізму ґрунтується на взаємодії магнітного поля струму з вихровими струмами в немагнітному диску. Прилад складається з двох електромагнітів, магнітні потоки яких пронизують немагнітний металевий (алюмінієвий) диск. Магнітний потік першого електромагніту пропорційний напрузі в колі, а другого

електромагніту – струмові. Обидва магнітні потоки Φ_1 і Φ_2 пронизуючи диск індують в ньому вихрові струми I_1 та I_2 . Конструкція та розташування електромагнітів такі, що I_1 взаємодіє з Φ_2 , а I_2 з Φ_1 . Така подвійна взаємодія викликає обертальний момент, пропорційний напрузі, струмові і куту зсуву фаз між ними. Таким чином **частота обертання диску пропорційна потужності**. Постійний магніт служить для створення гальмівного моменту.

5. Прилади електростатичної системи.

В електростатичних приладах є дві системи заряджених провідних пластин, одна з яких рухома. За рахунок їх взаємодії утворюється обертальний момент, який і сприяє відхиленню вимірювальної стрілки на осі приладу. Електростатичні системи використовуються для вимірювання напруг у вольтметрах.

На передній панелі всіх приладів є дані про їх принцип дії, точність, спосіб використання тощо.

Особливості вимірювання електричних величин

1. Вимірювання струму.

Електричний струм вимірюється **амперметрами**. Для визначення сили струму ділянки кола необхідно, щоб весь струм проходив через вимірювальний механізм, тобто амперметри підключаються послідовно. Для того, щоб амперметр не змінював вимірювального струму він повинен мати дуже малий опір. Ряд амперметрів, наприклад, магнітоелектричної системи, можуть вимірювати тільки малі струми (до 10 мА). Для розширення меж вимірювання амперметрів використовують шунти. **Шунтом** називається дуже малий опір, який вмикається послідовно з навантаженням для розширення меж вимірювання амперметра. Амперметр підключають паралельно до шунта, і тоді струм в колі рівний сумі струмів, які проходять через шунт і амперметр $I = I_a + I_{sh}$. Через малий опір $I_{sh} \gg I_a$ і переважно становить $I_{sh} = 99\%$ від I . Шунти виготовляють з **манганіну** – спеціального металевого сплаву, опір якого не залежить від температури. Часто шунти розташовані в середині амперметрів.

2. Вимірювання напруги.

Напругу вимірюють вольтметрами. Щоб виміряти напругу, або різницю потенціалів між двома точками, до них приєднують вольтметр. Для того, щоб вольтметр не змінював струму в колі необхідно, щоб струм через нього проходив мінімальний ($I_V \rightarrow 0$), тому послідовно

із струмоведучою частиною вольтметра вмикають додатковий опір з манганіну.

3. Вимірювання потужності.

Загальновідомий вираз для електричної потужності $P=UI$ дозволяє використовувати для її вимірювання метод амперметра і вольтметра. Крім того ще існує метод ватметра, найчастіше електродинамічної системи. Як відомо, в цьому випадку відхилення стрілки ватметра буде пропорційне добутку струмів двох котушок I_1I_2 , але один з них можна виразити через напругу.

Вимірювання електричної енергії проводять, як правило, лічильниками електричної енергії з індукційними механізмами.

4. Вимірювання опорів.

Закон Ома дозволяє використовувати для вимірювання опорів метод амперметра і вольтметра. Крім цього часто використовують відомий з фізики метод моста опорів. Застосовують також метод омметра, в якому шкала приладу проградуєрована безпосередньо в омах. В омметрах використовують додатковий генератор живлення вимірювального механізму, як правило, механічний, обертаючи спеціальною ручкою ротор.

5. Вимірювання неелектричних величин.

Сучасне виробництво не можливе без автоматичного контролю режимів технологічного процесу (температури, тиску, розмірів, вологості тощо). Електричні методи вимірювання цих величин є найточнішими. Для цього необхідна наявність вимірювального перетворювача, або **датчика**, який перетворює неелектричні величини в електричні, підсилювача і вимірювального приладу.

В датчиках використовують різноманітні фізичні ефекти і пристрої на їх основі: терморезистори, термопари, тензорезистори, п'єзоелектричні, індуктивні, ємнісні, реостатні, фотоелектричні перетворювачі.

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 ввімкне-

ний в розсічення цієї ділянки кола, тобто послідовно з навантаженням рис. 6.

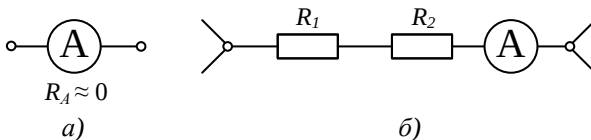


Рис. 6. Схема ввімкнення амперметра

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. 7.

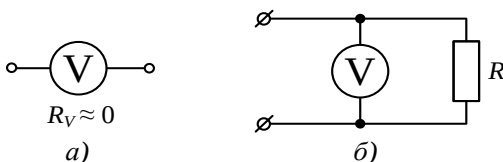


Рис. 7. Схема ввімкнення вольтметра

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

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

Для вимірювання потужності існують спеціальні прилади, які називаються **ватметрами**. Потужність постійного струму вимірюється ватметрами електродинамічної системи, струмова обвитка яких вмикається послідовного, а напругова – паралельно до елемента (рис. 8).

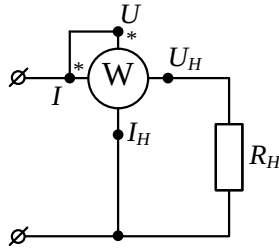


Рис. 8. Схема ввімкнення ватметра.

У трифазних колах при симетричному навантаженні використовують один ватметр рис. 9а. В трифазних колах із симетричним навантаженням за допомогою ватметра можна виміряти реактивну потужність рис. 9б.

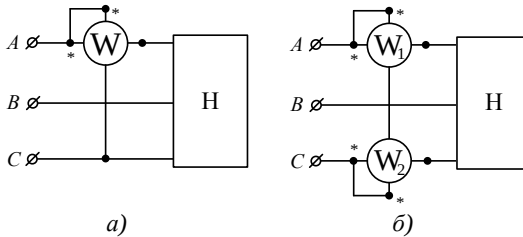


Рис. 9. Схема ввімкнення ватметрів у трифазних колах

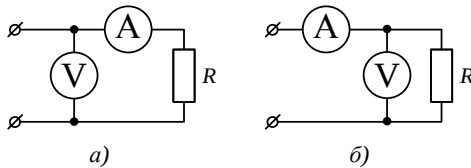


Рис. 10. Схема для вимірювання опору

Вимірювання опору. Найпростішим способом вимірювання опору є **метод амперметра-вольтметра** (рис. 10а). Для вимірювання малих опорів використовують схему на рис. 10б.

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. 11).

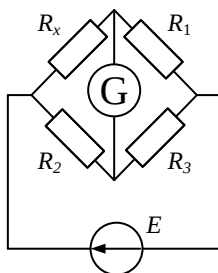


Рис. 11. Схема вимірювального моста

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 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.

Приклад 1. При вимірюванні струму одержали значення струму $I_1 = 25,5 \text{ A}$, тоді як діюче значення було $I = 25 \text{ A}$. Визначити абсолютну і відносну похибки вимірювання.

Розв'язок. Абсолютна похибка рівна:

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

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

Приклад 2. Для вимірювання ЕРС генератора до його клем в неробочому режимі (холостому ході) під'єднано вольтметр, опір якого 1200 Ом . Внутрішній опір генератора $0,6 \text{ Ом}$. 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 5 А. 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 Ом. Який струм проходить в колі, якщо амперметр зашунтований опором 0,005 Ом, показує 4,5 А.

Розв'язок. Шунт і амперметр з'єднані паралельно. Струми, що проходять в пасивних паралельних вітках (що не мають в своєму складі ЕРС), обернено пропорційні опорам цих віток:

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

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

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

Розв'язок. Втрати потужності в амперметрі

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

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

Розв'язок. За першим законом Кірхгофа $I = I_{A1} + I_{A2}$ або

$$I_{A1} + I_{A2} = 8.$$

З другого боку, відношення струмів у пасивних паралельних вітках дорівнює оберненому відношенню їх опорів:

$$\frac{I_{A1}}{I_{A2}} = \frac{R_{A2}}{R_{A1}} \quad \text{або} \quad \frac{I_{A1}}{I_{A2}} = \frac{0,1}{0,08} = 1,25.$$

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

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

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

Висновок. Недоцільно паралельно вмикати два амперметри з різними номінальними значеннями, але з різними внутрішніми опорами, так як сумарний струм не ділиться між ними порівно. Крім цього в той час коли амперметр з меншим опором R_A буде завантажений до межі, другий амперметр залишається недозавантаженим:

$$R_{A1} = 0,1 \text{ Ом} \quad I_{A1} = 3,56 \text{ А} \quad I_{n1} = 5 \text{ А}$$

$$R_{A2} = 0,08 \text{ Ом} \quad I_{A2} = 4,44 \text{ А} \quad I_{n1} = 5 \text{ А.}$$

Запитання для самоперевірки

1. Що називається електричними вимірюваннями і приладами?
2. Які прилади називаються аналоговими і цифровими?
3. Які Ви знаєте характеристики електровимірювальних приладів?
4. Приведіть класифікацію електровимірювальних приладів.

Тема 3. Електричні машини постійного струму

Після вивчення даного розділу

Ви повинні знати:

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

Ви повинні вміти:

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

Основні теоретичні відомості

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

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

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

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

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

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

За **способом збудження** ЕМПС поділяються на:

- машини із **незалежним збудженням** (рис. 12а), в яких обмотка збудження живиться від незалежного (стороннього) джерела електричної енергії;

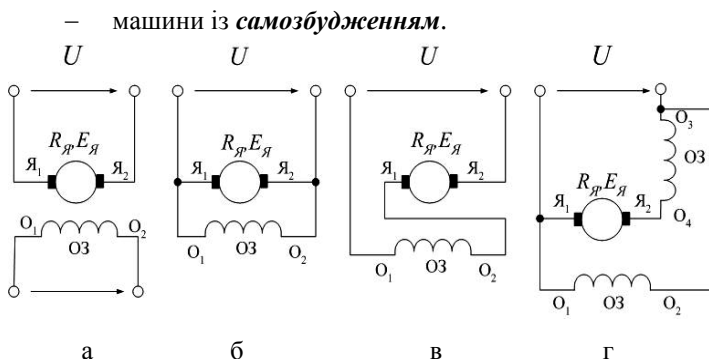


Рис. 12. Схеми способів збудження електричних машин постійного струму

ЕМПС із самозбудженням в свою чергу поділяються на машини:

- **паралельного збудження (шунтові)**, в яких обвитка збудження під'єднана паралельно до обвитки якоря (рис. 12а);
- **послідовного збудження (серієсні)**, в яких обмотка збудження під'єднана послідовно до обмоток якоря, тому в обвитці збудження і якорі тече однаковий струм $I = I_я = I_зб$ (рис. 12б);
- **змішаного збудження (компаундні)**, в яких є дві обвитки збудження: одна із них під'єднується послідовно до обвитки якоря, а друга – паралельно (рис. 12г).

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 ($Я_1$, $Я_2$ на рис. 12) визначається за формулою:

$$U_я = E - I_я R_я,$$

де E – ЕРС обмоток якоря; $I_я$ – струм якоря; $R_я$ – опір обмоток якоря.

Це рівняння називається **рівнянням генератора**.

Струм якоря в генераторах із самозбудженням:

$$I_{\text{я}} = I + I_{\text{зб}},$$

де $I_{\text{зб}}$ – струм в обвитті 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 $R_{\text{зб}}$, тобто $U = f(I)$ при $n = \text{const}$, $R_{\text{зб}} = \text{const}$.

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

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:

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

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

Рівняння напруг для двигуна має вигляд:

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

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:
$$R_{\text{П}} = \frac{U}{I_{\text{яП}}} - R_{\text{я}},$$

де U – номінальна напруга, що подається на обмотку якоря або двигуна; $I_{\text{яП}}$ – пусковий струм якоря.

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

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

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

Частоту обертання регулюють такими способами:

1. Введенням додаткового опору в коло якоря. Тоді частота

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

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 $I_{\text{зб}} = \text{const}$, 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** $P_2 = P_{\text{ген}} = U_{\text{ген}} I$.

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

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

Коефіцієнт корисної дії електричних машин постійного струму рівний:

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

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

Розрахунок робочих характеристик електричних машин

1. Генератор постійного струму незалежного збудження (рис.13) має наступні номінальні дані: потужність $P_{\text{ном}} = 11,5 \text{ кВт}$, напругу $U_{\text{ном}} = 230 \text{ В}$. Опір кола якоря $R_{\text{я}} = 0,18 \text{ Ом}$. Визначити ЕРС генератора $E_{\text{я}}$, та напругу U на його затискачах, якщо навантаження генератора зменшиться у два рази.

Проведення розрахунків

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

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

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

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

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

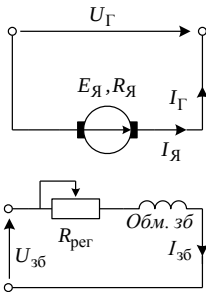


Рис. 13

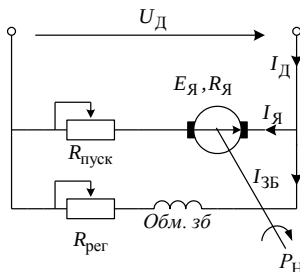


Рис. 14

2. Двигун постійного струму паралельного збудження (рис. 14), має наступні номінальні дані: $P_H = 9,375 \text{ кВт}$, $U_H = 250 \text{ В}$, коефіцієнт корисної дії $\eta = 0,75$, частоту обертання $n_H = 975 \text{ об/хв}$. Опір кола якоря $R_{\text{я}} = 0,25 \text{ Ом}$. Розрахувати споживану двигуном потужність $P_{\text{д}}$, номінальний обертовий момент M_H 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:

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

Визначаємо номінальний обертовий момент:

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

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

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

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. 1 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 $P_H = 3,0 \text{ кВт}$, 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 $K_M = 3$. Напруга живлення $U_H = 380 \text{ В}$, 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

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

Обчислимо синхронну швидкість (частота обертання) поля статора:

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

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:

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

Приклади розв'язування задач

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

Розв'язок. Використовуємо вираз для ЕРС генератора:

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

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

Розв'язок. Знаходимо ЕРС генератора:

$$E = C_E \Phi n = 17 \cdot 0,024 \cdot 15000 = 612 \text{ В.}$$

При неробочому режимі для шунтового генератора:

$$I_{\text{я}} = I_{\text{зб}} = \frac{E}{R_{\text{зб}} + R_{\text{я}}} = \frac{612}{98,8 + 1,2} = 6,12 \text{ А.}$$

Цей струм буде створювати спад напруги на якорі:

$$\Delta U = R_{\text{я}} I_{\text{я}} = 1,2 \cdot 6,12 = 7,344 \text{ В.}$$

Напругу на клеммах генератора визначаємо з рівняння генератора:

$$U = E - R_{\text{я}} I_{\text{я}} = 612 - 7,344 = 604,66 \text{ В.}$$

Приклад 3. Генератор паралельного збудження має такі паспортні дані: $P_{\text{н}} = 4,5 \text{ кВт}$, $U_{\text{н}} = 220 \text{ В}$; $n_{\text{я}} = 1000 \text{ об/хв}$, $R_{\text{я}} = 0,65 \text{ Ом}$, $R_{\text{зб}} = 98 \text{ Ом}$. Обчислити струм якоря, ЕРС генератора.

Розв'язок. Потужність генератора, яку він віддає в номінальному режимі рівна: $P_{\text{н}} = U_{\text{н}} \cdot I_{\text{н}}$.

Обчислюємо струм навантаження:

$$I_{\text{н}} = \frac{P_{\text{н}}}{U_{\text{н}}} = \frac{4,5 \cdot 10^3}{220} = 20,45 \text{ А.}$$

Струм збудження шунтового генератора:

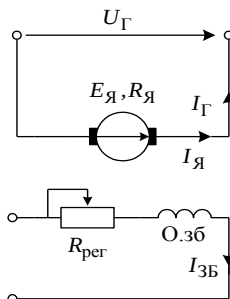
$$I_{\text{зб}} = \frac{U_{\text{н}}}{R_{\text{зб}}} = \frac{220}{98} = 2,245 \text{ А.}$$

Струм якоря генератора знаходимо за першим законом Кірхгофа: $I_{\text{я}} = I_{\text{зб}} + I_{\text{н}} = 2,245 + 20,45 = 22,695 \text{ А.}$

ЕРС в номінальному режимі визначаємо з рівняння генератора:

$$E = U_{\text{я}} + I_{\text{я}} R_{\text{я}} = 220 + 0,65 \cdot 22,695 = 234,75 \text{ В.}$$

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



Розв'язок: Визначаємо номінальний струм генератора:

$$I_H = \frac{P_H}{U_H} = \frac{11,5 \cdot 10^3}{230} = 50 \text{ А. ЕРС генератора визначається за формулою: } E_{\text{я}} = U + I_{\text{я}} R_{\text{я}} = 230 + 0,18 \cdot 50 = 239 \text{ В.}$$

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

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

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

Розв'язок. Для пуску двигуна без пускового реостата

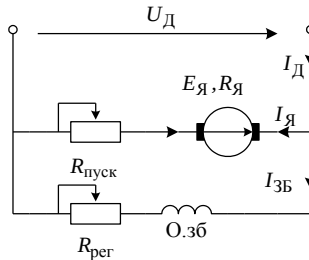
$$I_{\text{я}} = \frac{U}{R_{\text{я}}}, \quad \text{звідки} \quad R_{\text{я}} = \frac{U}{I_{\text{я}}} = \frac{220}{450} = 0,49 \text{ Ом.}$$

Для пуску двигуна з реостатом $I_{\text{я}} = \frac{U}{R_{\text{я}} + R_{\text{п}}}$, тоді

$$R_{\text{я}} + R_{\text{п}} = \frac{U}{I_{\text{я}}} = \frac{220}{72} = 3,05 \text{ Ом.}$$

Звідси $R_{\Pi} = 3,05 - R_{я} = 3,05 - 0,49 = 2,56 \text{ Ом}$.

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



Розв'язок. Визначаємо потужність, споживану двигуном:

$$P_D = \frac{P_H}{\eta} = \frac{9,375}{0,75} = 12,5 \text{ кВт}.$$

Визначаємо номінальний обертовий момент:

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

Визначаємо номінальний струм двигуна I_D :

$$I_D = \frac{P_D}{U_H} = \frac{12500}{250} = 50 \text{ А}.$$

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

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

За умовою пусковий струм не повинен перевищувати

$$I_{\Pi} \leq 3I_D = 3 \cdot 50 = 150 \text{ А}.$$

Із рисунку випливає, що $I_{II} = \frac{U}{R_{Я} + R_{II}}$, отже опір пускового

$$\text{реостата } R_n = \frac{U - 3I_{II}R_{Я}}{3I_{II}} = \frac{250 - 150 \cdot 0,25}{150} = 1,42 \text{ Ом}.$$

Задачі для самостійного розв'язування

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

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

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

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

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

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

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

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

Відповідь: 114,9 В.

Задача 9. Визначити струми якоря і обвитки збудження генератора паралельного збудження, якщо напруга на затискачах генератора $U = 230 \text{ В}$, опір кола збудження $R_{\text{зб}} = 29,5 \text{ Ом}$, струм навантаження $I_H = 25 \text{ А}$.

Відповідь: 32,8 А, 7,8 А.

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

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

Задача 12. Напруга на затискачах генератора змішаного збудження $U = 115 \text{ В}$. Опір обвитки якоря $R_{\text{я}} = 0,24 \text{ Ом}$, а опір послідовної обвитки збудження $R_{\text{збл}} = 0,06 \text{ Ом}$. Визначити ЕРС обвитки якоря генератора і опір паралельної обвитки збудження, якщо струм навантаження генератора $I = 40 \text{ А}$, а струм збудження $I_{\text{зб}} = 1,5 \text{ А}$.

Відповідь: 127,45 В; 76,6 Ом.

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

Відповідь: 13,8 кВт.

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

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

Задача 16. Визначити напругу живлення двигуна постійного струму, якщо номінальний струм якоря $I_{\text{я}} = 10 \text{ А}$, ЕРС обвитки якоря при номінальній частоті обертання якоря $E = 105 \text{ В}$, опір кола якоря $R_{\text{я}} = 0,5 \text{ Ом}$.

Відповідь: 110 В.

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

Відповідь: 45 А.

Задача 18. Напруга живлення двигуна паралельного збудження $U = 220 \text{ В}$. Пусковий струм якоря без пускового реостата дорівнює $I_{\text{я}} = 275 \text{ А}$. Визначити струм якоря під час роботи двигуна, якщо ЕРС обвитки якоря $E = 210 \text{ В}$. **Відповідь: 12,5 А.**

Задача 19. Двигун з паралельним збудженням живиться від джерела з напругою $U = 220 \text{ В}$ й має опір кола якоря $R_{\text{я}} = 0,4 \text{ Ом}$, номінальний струм $I_{\text{н}} = 20 \text{ А}$. Визначити пусковий струм двигуна без пускового реостата і опір пускового реостата за умови $I_{\text{п}} = 2,5 I_{\text{н}}$.

Відповідь: 550 А, 4 Ом.

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

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

Задача 22. Двигун постійного струму споживає струм $I_{\text{н}} = 103 \text{ А}$ від джерела живлення з напругою $U = 220 \text{ В}$. Визначити обертовий момент на валу двигуна, якщо ККД дорівнює 80 %, частота обертання $n = 750 \text{ об/хв.}$

Відповідь: 230 Нм.

Задача 23. Номінальна потужність двигуна постійного струму при напрузі $U = 110 \text{ В}$, струмі $I_{\text{н}} = 28,3 \text{ А}$, частоті обертання $n = 1500$

об/хв. дорівнює $P_H = 2,5 \text{ кВт}$. Визначити ККД, обертовий момент двигуна.

Відповідь: $0,8, 15,9 \text{ Нм}$.

Задача 24. Визначити частоту обертання двигуна паралельного збудження в неробочому режимі, якщо $U = 220 \text{ В}$, $I_H = 108 \text{ А}$, $n = 10^3 \text{ об/хв.}$, $R_A = 0,08 \text{ Ом}$, $I_{\text{зб}} = 3 \text{ А}$. **Відповідь:** 1040 об/хв.

Запитання для самоперевірки

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

Тема 4. Основи електроприводу та його апаратури.

Загальні поняття

Електропривід – це електромеханічний пристрій, який здійснює перетворення електричної енергії в механічну і забезпечує електричне керування механічною енергією.

Електропривід складається з електродвигуна, механізму передачі від двигуна до споживача і засобів керування та автоматизації.

Взагалі електропривід приводить в рух різного роду машини і механізми.

Розрізняють три види електроприводу: одиночний, груповий і багатодвигунний.

Одиночним називається електропривід, в якому один двигун приводить в рух одну робочу машину (центрифуга, електром'ясорубка, токарний станок тощо).

Груповим називається електропривід, в якому рух від одного електродвигуна за допомогою одного, чи кількох механізмів передається групі робочих машин. Цей вид застарілий і використовується рідко. **Багатодвигунним** називається електропривід, в якому робочий механізм обслуговується декількома двигунами. Це найновіший вид електроприводу і використовується, зокрема, на сучасних технологічних лініях.

Вибір електродвигунів електроприводу

Вибір електродвигуна (ЕД) – важлива, і часто складна інженерна задача. Найчастіше ЕД вибирають за такими показниками: потужність, рід струму, частота обертання, конструктивні особливості.

1. Вибір електродвигуна за потужністю.

Навантаження ЕД обмежується допустимим нагріванням його окремих частин. Як правило, при зростанні навантаження зростає струм в обмотках ротора, а отже і теплота Джоуля, тобто температура ЕД піднімається. Для того щоб взнати на скільки зросте температура ЕД, потрібно скласти рівняння теплового балансу і розв'язати його. Підвищення температури є шкідливим для ЕД. Особливо чутлива до цього ізоляція обмоток. При підвищенні температури вище 100 °С ізоляція може руйнуватись і окремі частини обмоток замикаються. Тоді виникають струми короткого замикання, які за короткий час приводять до повного руйнування, або горіння ізоляції. Тому є такий побутовий термін – двигун “згорів”.

В залежності від того, як нагрівається ЕД, як змінюється потужність його роботи розрізняють наступні його режими роботи:

- **Тривалий режим (S1)**, при якому стабільне навантаження триває невизначено довгий час. При цьому ЕД нагрівається до певної температури, яка залишається незмінною (вентилятори, компресори тощо).

- **Короткочасний режим (S2)**, який характеризується короткими робочими періодами, під час яких двигун не встигає досягнути номінальної температури, і довгими періодами зупинок, під час яких він встигає повністю охолонути.

Дуже важливо правильно вибрати ЕД за потужністю, оскільки завищена потужність веде до збільшення капітальних затрат і зменшення ккд, а занижена – до зменшення продуктивності, “згоряння” ЕД. Тому слід враховувати режими роботи ЕД, види навантажень, класи ізоляції (А, Е, В, F, Н на основі тканини, шовку, паперу, органічних плівок, азбесту, скловолокну, слюди, кремній-органічних речовин) та інші фактори. Для цього існують спеціальні розрахунки, формули, таблиці, довідники.

2. Вибір електродвигуна за родом струму.

Як відомо ЕД бувають постійного і змінного струму. ЕД постійного струму мають єдину перевагу – можливість плавного і економічного регулювання частоти обертання. У всьому іншому ЕД змінного струму простіші, дешевші, надійніші. Тому ЕД постійного струму використовують там, де є високі вимоги до регулювання частоти. І ще одна їх зручність – простота підведення живлення. Наприклад, в трамваях це лише один провід, а другим служать рейки.

3. Вибір електродвигуна за частотою обертання.

При однаковій потужності розміри ЕД безпосередньо пов'язані з частотою обертання їх валу (при зменшенні розмірів частота зростає). Тому бажано вибирати швидкісні ЕД.

Для узгодження частот обертання ЕД і виконавчого механізму використовують редуктори. З метою підвищення ккд електроприводу частоту обертів ЕД слід підбирати так, щоб кількість передач редуктора була мінімальною.

Одним з найпоширеніших є чотириполюсний ЕД з Якщо необхідно, щоб то використовують спеціальні генератори підвищеної частоти.

4. Вибір електродвигуна за конструктивним виконанням.

За типом конструкції ЕД поділяються на двигуни відкритого, захищеного, закритого і вибухобезпечного типів.

а) **ЕД відкритого типу** не мають спеціальних захисних пристроїв. Вони використовуються в спеціальних сухих і чистих приміщеннях з персоналом, що добре обізнаний з технікою безпеки. Їхні переваги в найкращих умовах охолодження і найменших габаритних розмірах.

б) **ЕД захищеного типу** оснащені спеціальними пристроями, такими, як сітки, щитки та ін. які запобігають попаданню сторонніх предметів. Застосовуються в механічних, деяких технологічних та ін. цехах.

в) **ЕД закритого типу** мають пристрої, що захищають їх від проникнення їдких парів, газів, вологи, пилу. Використовуються в ряді технологічних процесів, деревообробних, цементних та ін. заводах.

г) **ЕД вибухобезпечного типу** мають герметичну оболонку, яка виключає проникнення повітря в середину машини. Використовуються на об'єктах де можуть виникати вогне- і вибухонебезпечні гази і середища (шахти, хімічні цехи тощо).

Запитання для самоперевірки

1. Що називається електроприводом?
2. Які Ви знаєте види електроприводу?
3. За якими показниками вибирають ЕД для виробництва?
4. В чому полягає вибір електродвигуна за потужністю?
5. Які Ви знаєте режими роботи електродвигунів?
6. Опишіть повторно-короткочасний та перемінний режими роботи електродвигуна.
7. Як вибирають електродвигун за родом струму?
8. В чому полягає вибір електродвигуна за частотою?
9. Як вибирати ЕД за конструктивним виконанням?
10. Опишіть електродвигуни відкритого і захищеного типу.
11. Охарактеризуйте електродвигуни закритого і вибухобезпечного типу.

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.С., 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. Вольинский 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.