

М. П. Розводюк

ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ

Задачі для самостійного розв'язування

$$\eta_{\max} = 1 - \frac{\Delta p_{\text{пост}} + \beta_{\text{опт}}^2 \cdot \Delta p_{\text{зм}}}{\beta_{\text{опт}} \cdot S_{\text{н}} \cdot \cos \varphi_2 + \Delta p_{\text{пост}} + \beta_{\text{опт}}^2 \cdot \Delta p_{\text{зм}}}$$

$$U_a = E_a - I_a R_a \Sigma$$

$$M = \frac{m U_1^2 \frac{R'_2}{s}}{\omega_1 \left[\left(R_1 + C_1 \frac{R'_2}{s} \right)^2 + (X_1 + C_1 X'_2)^2 \right]}$$

$$M_{\text{ем}} = \frac{m \cdot U \cdot E}{\omega_1 \cdot X_d} \sin(\theta) + \frac{m U^2}{2 \cdot \omega_1} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin(2\theta)$$

$$\beta_{\max} = \sqrt{\frac{\Delta p_{\text{пост}}}{\Delta p_{\text{зм}}}}$$

$$M = c_m \Phi I_a$$

$$n = \frac{U_a}{c_e \Phi} - \frac{R_a \Sigma M}{c_e c_m \Phi^2}$$

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

М. П. Розводюк

ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ

Задачі для самостійного розв'язування

Навчальний посібник

Вінниця
ВНТУ
2016

УДК 621.313
ББК 31.261я73
Р64

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 10 від 23.05.2013 р.)

Рецензенти:

В. М. Кутін, доктор технічних наук, професор
О. Б. Мокін, доктор технічних наук, професор
А. І. Гладир, кандидат технічних наук, доцент

Розводюк, М. П.

Р64 Електричні машини. Задачі для самостійного розв'язування : навчальний посібник / Розводюк М. П. – Вінниця : ВНТУ, 2016. – 65 с.

В навчальному посібнику приведені задачі для самостійного розв'язування студентами з розділів «Трансформатори», «Асинхронні машини», «Синхронні машини», «Машини постійного струму» дисципліни «Електричні машини». До кожного з розділів подані основні розрахункові формули. Навчальний посібник рекомендовано для студентів, що навчаються за напрямками 6.050702 «Електромеханіка», 6.050701 – «Електротехніка та електротехнології».

УДК 621.313
ББК 31.261я73

© М. Розводюк, 2016

Зміст

Вступ.....	4
1 Трансформатори.....	5
1.1 Задачі.....	5
1.2 Основні формули.....	9
2 Асинхронні машини.....	18
2.1 Задачі.....	18
2.2 Основні формули.....	24
3 Синхронні машини.....	38
3.1 Задачі.....	38
3.2 Основні формули.....	43
4 Машини постійного струму.....	50
4.1 Задачі.....	50
4.2 Основні формули.....	54
Література.....	64

Вступ

Навчальний посібник призначений для поглиблення знань студентів з дисципліни «Електричні машини» за рахунок розв'язування задач.

Задачі складено таким чином, що охоплюють практично весь матеріал по кожному з розділів:

- «Трансформатори»;
- «Асинхронні машини»;
- «Синхронні машини»;
- «Машини постійного струму».

Для зручного користування до кожного з розділів вказана рекомендована література та основні формули.

1 ТРАНСФОРМАТОРИ

Рекомендована література [1 – 7].

1.1 Задачі

1. На підстанції встановлено знижувальний силовий трансформатор ТМ-1000/6,3, обмотки якого з'єднані за схемою Y/Δ . Визначити фазні та лінійні напруги й струми обмоток, якщо напруга вихідної обмотки $U_{2л} = 0,4$ кВ.

2. Трифазний підвищувальний трансформатор має номінальні величини: $S_n = 1000$ кВА, $U_{1лн} = 0,69$ кВ, $U_{2лн} = 10$ кВ, $I_0 = 1,5\%$ від $I_{1фн}$, $U_{к\%} = 5,5\%$, з'єднання обмоток Y/Δ . Визначити лінійні та фазні струми й напруги, а також величини струму холостого ходу та напруги короткого замикання відповідно в амперах та вольтгах.

3. Трифазний знижувальний трансформатор типу ТМ-40/0,38 має струм холостого ходу $I_0 = 3\%$, магнітні втрати $P_0 = 0,15$ кВт. Схема з'єднання обмоток Δ/Δ . Визначити параметри вітки намагнічування електричної схеми заміщення, якщо опір первинної обмотки $R_1 = 0,06$ Ом, $X_{1\sigma} = 0,36$ Ом.

4. Однофазний трансформатор має такі номінальні дані: $S_n = 4000$ кВА, $U_{1н} = 20$ кВ, $U_{2н} = 3,15$ кВ, $u_k = 7,5\%$. Визначити номінальні струми обмоток, уставлені значення струму експлуатаційного короткого замикання, кратності цих струмів, а також коефіцієнт трансформації.

5. Трифазний силовий трансформатор ТД-16000/38,5 має напругу короткого замикання $U_k = 8\%$, втрати короткого замикання $\Delta p_{к.з} = 90$ кВт і коефіцієнт трансформації $k = 3,85$, схему обмоток – Y_0/Δ . Визначити фазні та лінійні напруги й струми обмоток, повний опір трансформатора при короткому замиканні та його складові.

6. У вторинній обмотці знижувального трансформатора ТМ-630/3 протікає струм $I_{2лн} = 910$ А при з'єднанні обмоток Y/Y_0 . Визначити лінійні й фазні струми первинної обмотки, лінійні й фазні напруги обох обмоток.

7. Однофазний трансформатор з номінальними струмами обмотки $I_{1лн} = 364$ А та $I_{2н} = 1000$ А має $U_k = 4000$ В, $P_k = 216$ кВт при живленні з боку обмотки низької напруги. Визначити повну, активну потужності та індуктивні опори первинної й вторинної (приведеної) обмоток, а

також опори реальної вторинної обмотки.

8. Трифазний трансформатор ТМ-1000/10 при з'єднанні обмоток $Y/Y-0$ в номінальному режимі має $I_{1лн} = 57,8$ А, $I_{2лн} = 2,513$ А, а також $R_k = 1,1$ Ом, $X_k = 5,4$ Ом. Визначити при номінальному навантаженні спад напруги вторинної обмотки при $\cos\varphi_2 = 0,8$, а також приведені значення лінійних напруг і струму вторинної обмотки.

9. Трифазний трансформатор ТМ-250/3 має $U_k = 4\%$, коефіцієнт трансформації $k = 13$ при схемі обмоток Y/Δ . Визначити усталені значення фазних струмів обмотки при експлуатаційному короткому замиканні та їх кратності.

10. Для трифазного трансформатора ТМ-6300/20, що має схему Y/Δ , необхідно визначити фазні та лінійні струми обох обмоток, корисну та споживану активні потужності, споживану реактивну потужність при заданих величинах: $U_{2лн} = 3,15$ кВ, $\eta_n = 0,98$, $\cos\varphi_2 = 0,8$.

11. Трифазний знижувальний трансформатор типу ТМ-25/0,66 працює в режимі холостого ходу при $I_0 = 3,2\%$. Активний опір фази первинної обмотки $R_1 = 1,96$ Ом, схема Y/Y , $\cos\varphi_0 = 0,16$. Визначити магнітні втрати трансформатора.

12. Трифазний трансформатор ТМ-100/35 в номінальному режимі при $U_{2лн} = 3,4$ кВ має $\eta = 0,97$. Визначити постійні та змінні втрати в цьому режимі при $\cos\varphi_2 = 0,85$, якщо постійні втрати становлять $1/3$ від змінних втрат. Визначити також потужність P_2 , при якій ККД досягає максимального значення, та величину η_{\max} .

13. Трифазний трансформатор має номінальні величини: $S_n = 160$ кВА, $U_{1лн} = 6$ кВ, $U_{2лн} = 0,23$ кВ, схема обмоток $Y/Y-0$. Опори фаз задані: $R_1 = R_2 = 1,9$ Ом, $X_{1\sigma} = X_{2\sigma} = 4,7$ Ом. Визначити напругу U_k і її складові $U_{ка}$, $U_{кр}$ та встановлені значення експлуатаційного струму короткого замикання обмоток.

14. Трифазний підвищувальний трансформатор має номінальну величину $S_n = 2500$ кВА, $U_{1лн} = 0,69$ кВ, $U_{2лн} = 10,5$ кВ, $I_0 = 3,5\%$, $P_0 = 62$ кВт, схема з'єднань обмоток Y/Δ . Нехтуючи опорами R_1 , $X_{1\sigma}$, $X_{2\sigma}$, R_2 визначити параметри намагнічувальної вітки схеми заміщення при живленні як з боку вторинної, так і з боку первинної обмоток.

15. Однофазний трансформатор з $S_n = 250$ кВА, $U_{1лн} = 10$ кВ, $U_{2лн} = 0,4$ кВ, $U_k = 4\%$, втрати короткого замикання $P_k = 1,4$ кВт. Визначити реактивні, активні та повні опори обмоток первинної та реальної вторинної.

16. Трифазний трансформатор при номінальному навантаженні та

$U_{1лн} = 35$ кВ споживає струм $I_{1лн} = 264$ А. При $\cos\varphi_2 = 0,8$ віддає в навантаження $I_{2лн} = 1468$ А, маючи при цьому $U_{2лн} = 6,3$ кВ при $\eta_n = 0,992$, схема обмоток Y_0/Δ . Визначити повні й активні потужності, підведені до трансформатора та на його навантаженні, активні втрати потужності, а також величину максимального ККД, якщо магнітні втрати в трансформаторі $P_0 = 17$ кВт.

17. Для трифазного потужного трансформатора, що має $S_n = 1,5$ кВА, $U_{1н} = 380$ В, $U_{2н} = 133$ В, схему з'єднання обмотки Y/Δ розрахувати номінальні лінійні та фазні струми обох обмоток та поперечні перерізи їх провідників, якщо густина струму обох обмоток $\Delta = 2,5$ А/мм².

18. Напряга трифазної мережі: високої напруги – $U_1 = 525$ кВ, низької напруги – $U_2 = 20$ кВ. Для цих напруг використовується три основних трансформатори з напругами $U_1/U_2 = 330/20$ кВ. Які схеми з'єднання обмоток повинні використовуватися на стороні високої та низької напруг?

19. Трифазний трансформатор увімкнений до трифазної мережі 35 кВ. Визначити вторинні лінійні та середні напруги при схемі з'єднання обмоток Δ/Y , Y/Y , Y/Δ , якщо коефіцієнт трансформації трансформатора $k = w_1/w_2 = 3,22$.

20. Трифазний трансформатор зі схемою обмоток Y/Δ та напругами $U_{1лн} = 10$ кВ, $U_{2лн} = 0,4$ кВ має напругу одного витка $U_e = 2,5$ В/виток. Визначити число витків кожної обмотки.

21. Первинні обмотки трьох однофазних трансформаторів, з'єднані трикутником та увімкнені на трифазну напругу 220 В. Три виводи вторинної обмотки позначені x - y - z і з'єднані у спільну точку. При перевірці вторинних напруг в режимі холостого ходу отримали $U_{ax} = U_{by} = U_{zc} = 20$ кВ, $U_{av} = U_{vc} = 20$ кВ, $U_{ca} = 35$ кВ. Чим пояснюється несиметрія лінійних напруг і які зміни в обмотці необхідно здійснити?

22. В трифазному трансформаторі з номінальними фазними напругами $U_{1фн} = 220$ В, $U_{2фн} = 133$ В подано номінальну напругу на фазу В обмотки ВН, розміщену на середньому стрижні тристрижневого плоского магнітопроводу, а всі інші фази розімкнені. Знайти значення напруги, які з'являються на розімкнених фазах обмотки ВН і НН.

23. Фази обмотки ВН і НН, розміщені на середньому стрижні тристрижневого плоского магнітопроводу, мають номінальні напруги $U_{1фн} = 220$ В, $U_{2фн} = 133$ В, намотані в одному напрямі, з'єднані між

собою послідовно. На фазу обмотки ВН подано номінальну напругу. Визначити сумарну напругу двох обмоток при їх узгодженому та зустрічному вмиканнях, вказати маркування початків та кінців обох фаз у кожному випадку. Як називається пристрій з таким з'єднанням обмоток?

24. Два трифазних трансформатори з потужностями $S_{H1} = 1000$ кВА й $S_{H2} = 1600$ кВА та номінальними напругами $U_{1\phi H} = 35$ кВ й $U_{2\phi H} = 10,5$ кВ і схемами з'єднання обмоток Y/Δ ввімкнені на паралельну роботу. На вторинній шині увімкнене транзисторне симетричне навантаження з опором однієї фази $Z_{HВ\phi} = 40$ Ом, з'єднане зіркою. Визначити первинні й вторинні фази та лінійні струми кожного трансформатора, вважаючи, що їхні напруги короткого замикання однакові.

25. Два трифазних трансформатори однакової потужності $S_{H1} = S_{H2} = 7,5$ кВА, що мають схеми обмоток Δ/Δ і напруги $U_{1H} = U_{2H} = 220$ В, увімкнені на паралельну роботу. Розрахувати зрівнювальні струми, що протікають в первинних та вторинних обмотках трансформаторів, якщо вони працюють без навантаження при основних напругах короткого замикання $U_{1KH} = U_{2KH} = 4\%$ та коефіцієнтах трансформації $k_1 = 1,65$ та $k_2 = 1,69$.

26. Два трифазних трансформатори однакової потужності, що мають схеми обмоток Δ/Δ та первинні напруги $U_{1H} = U_{2H} = 220$ В і однакові напруги короткого замикання, ввімкнені на паралельну роботу. Визначити напругу, яка встановлюється на вторинних шинах в режимі холостого ходу, якщо $k_1 = 1,65$, а $k_2 = 1,69$.

27. Два трифазних трансформатори однакової потужності $S_{H1} = S_{H2} = 7,5$ кВА, які мають схеми обмоток Δ/Δ , первинні напруги $U_{1H} = U_{2H} = 220$ В, напруги короткого замикання $U_{1KH} = U_{2KH} = 4\%$, а також $k_1 = 1,65$ та $k_2 = 1,69$, увімкнені на паралельну роботу. Нехтуючи активними складовими U_K , розрахувати вторинні струми трансформаторів, якщо на вторинні шини увімкнений споживач з еквівалентним опором однієї фази $Z_{HВ} = R_{HВ} = 17$ Ом. Опори навантаження з'єднані в трикутник.

28. Два трифазних трансформатори однакової потужності $S_{H1} = S_{H2} = 7,5$ кВА, що мають схеми обмотки Δ/Δ , первинні напруги $U_{1H} = U_{2H} = 220$ В, напруги короткого замикання $U_{1KH} = U_{2KH} = 4\%$, а також $k_1 = 1,65$ та $k_2 = 1,69$ увімкнені на паралельну роботу. Нехтуючи активними складовими U_K , розрахувати вторинні струми трансформаторів, якщо на вторинні шини увімкнений споживач з еквівалентним

опором однієї фази $Z_{нв} = jX_{нв} = 17$ Ом. Опори навантаження з'єднані в трикутник.

29. Два трифазних трансформатори однакової потужності $S_{н1} = S_{н2} = 7,5$ кВА, що мають схеми обмотки Δ/Δ , первинні напруги $U_{1н} = U_{2н} = 220$ В, напруги короткого замикання $U_{1кн} = U_{2кн} = 4\%$, а також $k_1 = 1,65$ та $k_2 = 1,69$ увімкнені на паралельну роботу. Нехтуючи активними складовими U_k , розрахувати вторинні струми трансформаторів, якщо на вторинні шини увімкнений споживач з еквівалентним опором однієї фази $Z_{нв} = -jX_{нв} = 17$ Ом. Опори навантаження з'єднані в трикутник.

30. Обчислити відносне значення зрівнювального струму (до номінального), який буде протікати в обмотках двох паралельно увімкнених трансформаторів однакової номінальної потужності з $U_{1к} = U_{2к} = 4\%$, але з різницею груп з'єднань: а) на одну групу; б) на дві групи. Чи допустима тривала така робота?

31. Два трифазних трансформатори потужністю $S_{1н} = 1000$ кВА та $S_{2н} = 2500$ кВА, а також $U_{ка1} = 6,5\%$ та $U_{ка2} = 7\%$ увімкнені на паралельну роботу. До якої потужності можна завантажити кожен із трансформаторів і яка сумарна потужність, що віддається ними в навантаження.

1.2 Основні формули

Коефіцієнт трансформації трансформатора:

$$k = \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2}, \quad (1.1)$$

де E_1, E_2 – ЕРС, індуковані в первинній та вторинній обмотках, відповідно;

w_1, w_2 – кількості витків первинної та вторинної обмоток, відповідно.

Номінальна повна потужність

– для однофазного трансформатора:

$$S_n = U_{1лн} I_{1лн}, \quad (1.2)$$

де $U_{1лн}$ – лінійна номінальна напруга первинної обмотки;

$I_{1лн}$ – лінійний номінальний струм первинної обмотки;

– для трифазного трансформатора:

$$S_H = \sqrt{3}U_{1лн}I_{1лн}. \quad (1.3)$$

Діючі значення ЕРС трансформатора:

$$\begin{aligned} E_j &= 4,44fw_j\Phi, \\ j &= 1, 2. \end{aligned} \quad (1.4)$$

де f – частота напруги;

Φ – магнітний потік.

Приведений струм вторинної обмотки:

$$I'_2 = \frac{I_2}{k}, \quad (1.5)$$

де I_2 – струм вторинної обмотки.

Приведена ЕРС вторинної обмотки:

$$E'_2 = kE_2. \quad (1.6)$$

Приведена напруга вторинної обмотки:

$$U'_2 = kU_2. \quad (1.7)$$

Приведені активний R'_2 , реактивний X'_2 та повний Z'_2 опори вторинної обмотки:

$$\begin{aligned} R'_2 &= k^2R_2, \\ X'_2 &= k^2X_2, \\ Z'_2 &= k^2Z_2, \end{aligned} \quad (1.8)$$

де R_2 , X_2 , Z_2 – активний, індуктивний та повний опори вторинної обмотки, відповідно.

Активний магнітний опір трансформатора:

– для однофазного трансформатора та для трифазного трансформатора при з'єднанні первинної обмотки в трикутник

$$R_m = \frac{P_0}{I_0^2}, \quad (1.9)$$

де P_0 – потужність холостого ходу, яка споживається з мережі;

I_0 – струм холостого ходу (первинної обмотки);

– для трифазного трансформатора при з'єднанні первинної обмотки в зірку

$$R_m = \frac{P_0}{3I_0^2}. \quad (1.10)$$

Повний магнітний опір трансформатора:

– для однофазного трансформатора

$$Z_m = \frac{U_{10}}{I_0}; \quad (1.11)$$

де U_{10} – напруга холостого ходу первинної обмотки;

I_0 – струм холостого ходу, який споживається з мережі;

– для трифазного трансформатора при з'єднанні первинної обмотки в зірку

$$Z_m = \frac{U_{10}}{\sqrt{3}I_0}; \quad (1.12)$$

– для трифазного трансформатора при з'єднанні первинної обмотки в трикутник

$$Z_m = \frac{\sqrt{3}U_{10}}{I_0}. \quad (1.13)$$

Індуктивний магнітний опір трансформатора:

$$X_m = \sqrt{Z_m^2 - R_m^2}. \quad (1.14)$$

Коефіцієнт потужності в режимі холостого ходу:

– для однофазного трансформатора

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{U_{10} I_0}; \quad (1.15)$$

– для трифазного трансформатора

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3} U_{10} I_0}. \quad (1.16)$$

Повний Z_k , активний R_k та індуктивний X_k опори короткого замикання трансформатора:

– однофазного

$$\begin{cases} Z_k = Z_1 + Z'_2 = \frac{U_{1k}}{I_{1k}}, \\ R_k = \frac{P_k}{I_{1k}^2} = Z_k \cos \varphi_k, \\ X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2}, \end{cases} \quad (1.17)$$

де Z_1 – повний опір первинної обмотки;

U_{1k} – напруга короткого замикання;

P_k – потужність короткого замикання;

I_{1k} – струм короткого замикання первинної обмотки;

$\cos \varphi_k$ – коефіцієнт потужності при короткому замиканні;

– трифазного при з'єднанні первинної обмотки в зірку

$$\begin{cases} Z_{\kappa} = \frac{U_{1\kappa}}{\sqrt{3}I_{1\kappa}}, \\ R_{\kappa} = \frac{P_{\kappa}}{3I_{1\kappa}^2}, \\ X_{\kappa} = \sqrt{Z_{\kappa}^2 - R_{\kappa}^2}. \end{cases} \quad (1.18)$$

– трифазного при з'єднанні первинної обмотки в трикутник

$$\begin{cases} Z_{\kappa} = \frac{\sqrt{3}U_{1\kappa}}{I_{1\kappa}}, \\ R_{\kappa} = \frac{P_{\kappa}}{I_{1\kappa}^2}, \\ X_{\kappa} = \sqrt{Z_{\kappa}^2 - R_{\kappa}^2}. \end{cases} \quad (1.19)$$

Повні опори первинної та приведені вторинної обмоток:

$$Z_1 + Z_2' = \frac{1}{2} Z_{\kappa}. \quad (1.20)$$

Коефіцієнт потужності при короткому замиканні трансформатора:

– однофазного

$$\cos \varphi_{\kappa} = \frac{P_{\kappa}}{U_{\kappa} I_{1\kappa}}; \quad (1.21)$$

– трифазного

$$\cos \varphi_{\kappa} = \frac{P_{\kappa}}{\sqrt{3}U_{\kappa} I_{1\kappa}}. \quad (1.22)$$

Номінальна напруга короткого замикання трансформатора:

– повна

$$U_{к.н\%} = \frac{I_{1к} Z_{к}}{U_{1н}} \cdot 100 = \frac{U_{к}}{U_{1н}} \cdot 100; \quad (1.23)$$

– активна

$$U_{к.а.н\%} = \frac{I_{1к} R_{к}}{U_{1н}} \cdot 100; \quad (1.24)$$

– реактивна

$$U_{к.р.н\%} = \frac{I_{1к} X_{к}}{U_{1ном}} \cdot 100. \quad (1.25)$$

При цьому

$$\begin{cases} U_{к.а.н\%} = U_{к.н\%} \cos \varphi_{к}; \\ U_{к.р.н\%} = U_{к.н\%} \sin \varphi_{к}; \\ U_{к.н\%} = \sqrt{U_{к.а.н\%}^2 + U_{к.р.н\%}^2}. \end{cases} \quad (1.26)$$

Потужність короткого замикання $P_{к}$ трансформатора беруть рівною його електричним втратам $\Delta p_{ел}$:

$$P_{к} = \Delta p_{ел} = I_{1к}^2 R_1 + I_{2к}^2 R'_2, \quad (1.27)$$

а потужність холостого ходу P_0 – рівною магнітним втратам $\Delta p_{м}$:

$$P_0 = \Delta p_{м}. \quad (1.28)$$

Коефіцієнт навантаження трансформатора:

$$\beta = \frac{I_2}{I_{2н}} = \frac{I_1}{I_{1н}}. \quad (1.29)$$

Процес перетворення енергії в трансформаторі характеризується енергетичною діаграмою, поданою на рис. 1.1.

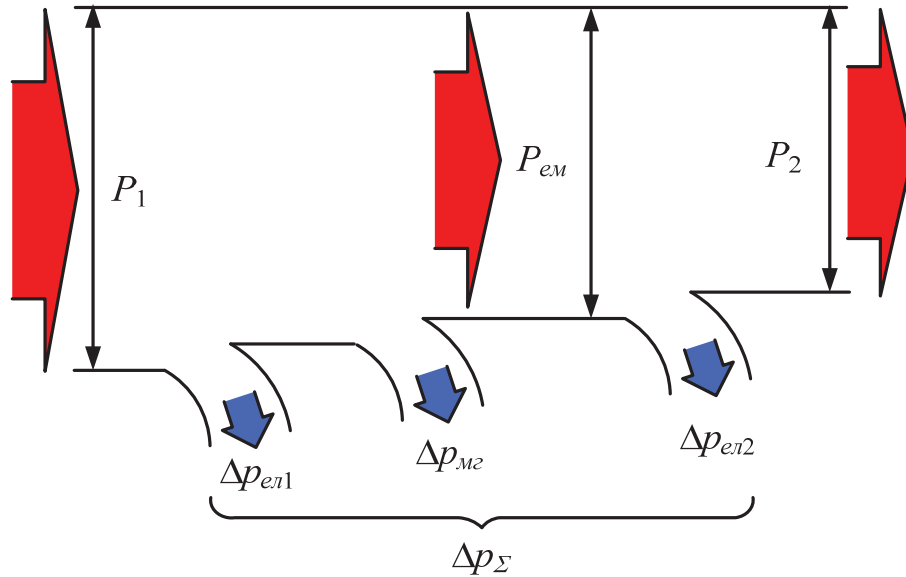


Рисунок 1.1 – Енергетична діаграма трансформатора

Сумарні втрати в трансформаторі:

$$\Delta p_{\Sigma} = \Delta p_{ел} + \Delta p_{мг}. \quad (1.30)$$

Електричні втрати:

$$\Delta p_{ел} = \Delta p_{ел1} + \Delta p_{ел2}, \quad (1.31)$$

де $p_{ел1}$ – електричні втрати в первинній обмотці;

$\Delta p_{ел2}$ – електричні втрати у вторинній обмотці,

$$\Delta p_{ел} = m(I_1^2 R_1 + I_2'^2 R_2'), \quad (1.32)$$

де m – число фаз в обмотках трансформатора.

Інший вираз для визначення електричних втрат через потужність короткого замикання:

$$\Delta p_{ел} = \beta^2 P_{к} = \beta^2 \Delta p_{ел.н} = \beta^2 I_2'^2 R_{к}. \quad (1.33)$$

Магнітні втрати:

$$\Delta p_M = \Delta p_\sigma + \Delta p_{вс}, \quad (1.34)$$

де Δp_σ – втрати від гістерезису;

$\Delta p_{вс}$ – втрати від вихрових струмів.

Сумарні втрати можна також визначити як

$$\Delta p_\Sigma = P_0 + \beta^2 P_\kappa. \quad (1.35)$$

Електромагнітна потужність трансформатора:

$$P_{ем} = P_1 - \Delta p_{ел1} - \Delta p_M. \quad (1.36)$$

ККД трансформатора:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{U_2 I_2 \cos \varphi_2}{U_1 I_1 \cos \varphi_1} \quad (1.37)$$

або

$$\eta = \frac{P_1 - \Delta p_\Sigma}{P_1} = 1 - \frac{\Delta p_\Sigma}{P_1}. \quad (1.38)$$

ККД трансформатора, виражений через коефіцієнт навантаження:

$$\eta = \frac{\beta S_H \cos \varphi_2}{\beta S_H \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_\kappa} \quad (1.39)$$

або

$$\eta = 1 - \frac{\beta^2 P_\kappa + P_0}{\beta S_H \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_\kappa}. \quad (1.40)$$

Оптимальний коефіцієнт навантаження β_{opt} , при якому ККД має максимальне значення:

$$\beta_{onm} = \sqrt{\frac{P_0}{P_k}} = \sqrt{\frac{\Delta p_{пост}}{\Delta p_{зм}}}, \quad (1.41)$$

де $\Delta p_{пост}$ – постійні втрати (магнітні втрати);

$\Delta p_{зм}$ – змінні втрати (електричні втрати).

Максимальний ККД трансформатора:

$$\eta_{\max} = 1 - \frac{\Delta p_{пост} + \beta_{onm}^2 \cdot \Delta p_{зм}}{\beta_{onm} \cdot S_n \cdot \cos \varphi_2 + \Delta p_{пост} + \beta_{onm}^2 \cdot \Delta p_{зм}}. \quad (1.42)$$

2 АСИНХРОННІ МАШИНИ

Рекомендована література [3 – 8].

2.1 Задачі

1. Трифазний асинхронний двигун з короткозамкненим ротором має такі номінальні паспортні величини: номінальна потужність $P_n = 1,7$ кВт, схеми та напруги обмоток $Y/\Delta - 380/220$ В, ККД $\eta_n = 73$ %, коефіцієнт потужності $\cos\varphi_{1n} = 0,81$. Знайти номінальні значення фазних та лінійних напруг і струмів обмотки статора, повну активну й реактивну потужності, які споживаються двигуном з мережі.

2. Ротор трифазного асинхронного двигуна обертається з номінальною швидкістю $n_{2n} = 577$ об/хв при частоті напруги мережі $f_1 = 50$ Гц. Знайти швидкість обертання магнітного поля статора, число полюсів двигуна та його номінальне ковзання.

3. Десятиполюсний трифазний асинхронний двигун живиться від мережі з частотою $f_1 = 50$ Гц і має на статорі двошарову обмотку з числом пазів в одній фазовій зоні (числом пазів на полюс і фазу) $q = 3$. Діаметр ротора статора $D = 0,9$ м, довжина сердечника статора $l = 0,7$ м, середнє значення індукції в повітряному проміжку машини від основної гармоніки поля $B_{\text{ср.1}} = 0,8$ Тл. Знайти діюче значення ЕРС від основної гармоніки поля, наведеної в одному витку статорної обмотки з укороченим кроком.

4. Трифазний 12-полюсний асинхронний двигун живиться від мережі з напругою промислової частоти $f_1 = 50$ Гц, його ротор обертається з ковзанням $s_n = 0,03$. Знайти швидкість обертання ротора та частоту ЕРС, яка в ньому наводиться.

5. На статорі трифазного 4-полюсного асинхронного двигуна вкладається двошарова розподілена обмотка, яка має число пазів на полюс і фазу $q = 4$ та число витків в котушці $w_k = 7$. Знайти ЕРС фази при послідовному й паралельному з'єднанні котушкових груп в ній, якщо ЕРС одного витка обмотки $E_v = 1,2$ В.

6. Трифазна 4-полюсна асинхронна машина має такі дані: число витків фази статорної обмотки $w_1 = 68$, роторної $w_2 = 27$, обмотковий коефіцієнт обмотки статора $k_{o\sigma 1} = 0,886$, ротора $k_{o\sigma 2} = 0,954$. Частота напруги мережі $f_1 = 50$ Гц, амплітуда основного магнітного потоку $\Phi_0 = 2,7 \cdot 10^{-2}$ Вб. Знайти діюче значення основних ЕРС обмоток статора й ротора при неру-

хомому роторі та при його обертанні зі швидкістю $n = 1000$ об/хв, а також коефіцієнт трансформації за ЕРС.

7. Трифазний асинхронний двигун зі з'єднанням обмотки статора в трикутник Δ працює в режимі холостого ходу при $U_1 = 220$ В і споживає з мережі струм $I_{10} = 4$ А й активну потужність $P_{10} = 230$ Вт. Знайти активну та реактивну складові фазного струму холостого ходу, повну й реактивну потужності, які споживаються двигуном з мережі, а також його постійні втрати, якщо активний опір однієї фази обмотки статора $R_1 = 2$ Ом.

8. Трифазний 4-полюсний асинхронний двигун зі з'єднанням обмотки статора в зірку Y працює в режимі номінального навантаження при номінальній напрузі мережі $U_{1н} = 380$ В і споживає з неї номінальний струм $I_{1н} = 3,3$ А. Знайти електромагнітну потужність й момент двигуна, якщо активний опір однієї фази обмотки статора $R_1 = 2$ Ом, магнітні втрати двигуна $\Delta p_m = 100$ Вт, а номінальний коефіцієнт потужності $\cos\phi_{1н} = 0,86$.

9. Трифазний 4-полюсний асинхронний двигун в номінальному режимі розвиває потужність на валу $P_n = 1,5$ кВт при швидкості обертання ротора $n_{2н} = 1440$ об/хв. ККД двигуна $\eta_n = 85\%$, а його механічні втрати $\Delta p_{мех} = 30$ Вт. Знайти електромагнітну потужність двигуна.

10. Трифазний асинхронний двигун підключений до мережі з напругою $U_{1н} = 220$ В і частотою $f_1 = 50$ Гц. 4-полюсна обмотка статора з'єднана в трикутник Δ . Двигун споживає з мережі струм $I_{1н} = 21$ А при $\cos\phi_{1н} = 0,82$, ККД $\eta_n = 83,7\%$ і ковзанні $s_n = 5,3\%$. Знайти швидкість обертання ротора, корисну потужність і момент, а також сумарні втрати.

11. Трифазний асинхронний двигун має при номінальній напрузі живлення магнітні втрати $\Delta p_m = 93$ Вт. Яке значення матимуть ці втрати, якщо статорну обмотку замість Δ помилково з'єднали в Y при тій самій напрузі живлення?

12. Активний опір обмотки статора, виміряний мостом постійного струму між його будь-якими двома лінійними виводами, становить R , Ом. Довести, що електричні втрати в цій обмотці можна розраховувати за однаковим виразом $\Delta p_{e1} = \frac{3}{2} I_{1л}^2 R$ як при з'єднанні її в Y , так і в Δ , де $I_{1л}$ – струм, який споживається обмоткою з мережі.

13. Трифазний асинхронний двигун споживає з мережі струм $I_{1л} = 24$ А при напрузі цієї мережі $U_{1л} = 380$ В і коефіцієнті потужності $\cos\phi_1 = 0,88$. Активний опір обмотки статора, виміряний між її двома виводами, $R_1 = 0,56$ Ом, ковзання $s = 0,033$. Визначити корисну, електромагнітну потужності і ККД двигуна вважаючи, що магнітні втрати в сердечнику стато-

ра дорівнюють половині електричних втрат його обмотки, а сума механічних і додаткових втрат становить 5% від сумарних втрат двигуна.

14. В трифазному асинхронному двигуні з номінальною корисною потужністю $P_n = 1,5$ кВт постійні та змінні втрати в номінальному режимі відповідно становлять 140 Вт і 260 Вт. Визначити номінальний і максимальний ККД двигуна, а також величину корисної потужності, при якій настає максимум ККД.

15. Трифазний асинхронний двигун обертає генератор постійного струму. При цьому асинхронний двигун споживає активну потужність $P_{1\partial}$, а корисна потужність генератора становить P_c . Виразити ККД всієї установки $\eta_{уст}$ через ККД двигуна η_{∂} і генератора η_c .

16. Визначити величину початкового пускового струму та початкового пускового моменту трифазного асинхронного двигуна при його прямому пуску за такими номінальними даними: $P_n = 7,5$ кВт, $U_{1\phi n} = 220$ В, $n_{2n} = 720$ об/хв, $\cos\phi_{1n} = 0,75$, $\eta_n = 86\%$, кратність початкового пускового моменту $M_n/M_n = 1,4$, кратність пускового струму $I_n/I_n = 6$.

17. 4-полюсний трифазний асинхронний двигун має такі параметри короткого замикання: $R_k = 0,11$ Ом, $X_k = 0,36$ Ом, $R_1 = 0,05$ Ом. Визначити початковий пусковий струм та початковий пусковий момент двигуна, який працює при фазній напрузі $U_{1\phi} = 380$ В і частоті $f_1 = 50$ Гц.

18. Трифазний асинхронний двигун з кратністю початкового пускового струму $k_I = I_n/I_n = 5,6$ і кратністю початкового пускового моменту $k_n = M_n/M_n = 1,3$ запускається в хід при моменті навантаження на валу $M_c = 0,5M_n$. Пусковий струм в мережі повинен бути обмежений до $I_m = 2,5I_n$. Чи можна застосувати в цьому випадку реакторний пуск?

19. За допомогою реактора струм в мережі при пуску трифазного асинхронного двигуна обмежили до значення $I_m = 2I_n$. Чи можливий пуск двигуна при моменті навантаження на валу $M_c = 0,15M_n$, якщо кратність пускового моменту $k_n = 1,2$, а кратність пускового струму $k_I = 5$?

20. Розрахуйте величину індуктивного опору реактора X_R для зниження пускового струму при реакторному пуску в 2 рази порівняно з прямим пуском трифазного асинхронного двигуна. Параметри короткого замикання двигуна: $R_k = 0,08$ Ом, $X_k = 0,3$ Ом.

21. Розрахувати фазні й лінійні значення пускових струмів трифазного асинхронного двигуна при з'єднанні обмотки в трикутник і в зірку, якщо напруга мережі $U_m = 220$ В і опір фази $Z_{кф} = 72$ Ом.

22. Знайти кратність пускового моменту трифазного асинхронного двигуна при його пуску перемиканням статорної обмотки із зірки в трикутник, якщо його паспортна кратність пускового моменту $k_n = 1,2$.

23. Пуск трифазного асинхронного двигуна виконується за допомогою знижувального автотрансформатора з коефіцієнтом трансформації $k = 1,5$. В скільки разів зменшиться струм, який споживається при пуску з мережі? Чи можливий пуск двигуна при $M_c = 0,5 M_n$, якщо кратність початкового пускового моменту двигуна $k_n = 1,1$?

24. Номінальна потужність трифазного асинхронного двигуна $P_n = 2000$ кВт, номінальна швидкість обертання $n_{2n} = 1490$ об/хв, кратність початкового пускового моменту $k_n = 1,2$. Напруга живлення мережі $U_{1m} = 6$ кВ. Обмотка статора з'єднана в зірку. Визначити початковий пусковий момент двигуна при автотрансформаторному пуску зі зниженням напруги на затискачах двигуна до $U_1 = 4$ кВ.

25. Номінальна потужність трифазного асинхронного двигуна $P_n = 315$ кВт, номінальна фазна напруга $U_{1фн} = 220$ В, швидкість обертання $n_{2n} = 1490$ об/хв, $\eta_n = 94,5\%$, $\cos\varphi_{1n} = 0,91$. Кратність пускового моменту $k_n = 1,1$. Кратність пускового струму $k_I = 7$. Двигун запускається від мережі з напругою 220 В. Визначити початковий момент і струм, який споживається з мережі, при пуску двигуна перемиканням обмотки статора з зірки в трикутник. Чи можливий пуск двигуна при навантаженні $M_c = 0,25M_n$?

26. Активний опір фази обмотки ротора трифазного асинхронного двигуна з фазним ротором $R'_2 = 0,05$ Ом. Критичне ковзання $s_{кр} = 0,18$. Визначити опір фази пускового реостата, при увімкненні якого в коло ротора двигун буде розвивати максимальний момент.

27. Трифазний асинхронний двигун з фазним ротором має такі параметри: $X_1 = 0,28$ Ом, $X'_2 = 0,35$ Ом, $R'_2 = 0,07$ Ом. Знайти відношення R'_{II}/R'_2 для досягнення максимального пускового моменту (R'_{II} – опір пускового реостата).

28. Швидкість обертання ротора однофазного асинхронного 4-полюсного двигуна $n_2 = 1400$ об/хв, частота мережі живлення $f_1 = 50$ Гц. Знайти ковзання ротора відносно прямого й зворотного полів обмотки статора.

29. В обмотці нерухомого ротора однофазного асинхронного двигуна наводиться ЕРС $E = 20$ В. Визначити значення й частоту ЕРС, наведених в цій же обмотці полями прямої й зворотної послідовності обмотки статора при обертанні ротора зі швидкістю $n_2 = 2850$ об/хв.

30. При живленні від мережі з частотою $f_1 = 50$ Гц ротор однофазного асинхронного двигуна обертається зі швидкістю $n_2 = 345$ об/хв. При цьому

полем прямої послідовності в обмотці ротора наводиться ЕРС $E_{2np} = 2,4$ В. Знайти ковзання ротора відносно прямого й зворотного полів статора, значення й частоту ЕРС ротора від зворотного поля статора.

31. При роботі трифазного асинхронного двигуна, який має такі параметри: $Y/\Delta - 380/220$ В; $I_Y/I_\Delta = 3,52/6,1$ А; $\eta = 0,82$; $\cos\varphi_{1n} = 0,9$ в номінальному режимі при з'єднанні обмотки статора в зірку відбувся обрив одного провідника живлення. Знайти струм, який споживається двигуном з мережі після обриву, а також його активну й реактивну складові, якщо відомо, що ККД двигуна зменшиться до значення 0,8, а корисна потужність на валу залишилась незмінною.

32. Трифазний асинхронний двигун із з'єднанням обмотки статора в зірку споживає із мережі струм $I_1 = 3,20$ А при напрузі мережі $U_{1n} = 380$ В і коефіцієнті потужності $\cos\varphi_{1n} = 0,82$. Визначити електричні втрати в обмотках статора й ротора після обриву однієї з фаз статора, якщо швидкість обертання ротора стала $n_2 = 1400$ об/хв, активний опір фази статора $R_1 = 3,4$ Ом. Магнітні втрати двигуна взяти рівними половині електричних втрат в статорі в трифазному режимі.

33. Трифазний асинхронний двигун із номінальною потужністю $P_n = 1,7$ кВт споживає з мережі активну потужність $P_{1n} = 2,06$ кВт. Відомо, що постійні втрати двигуна в трифазному режимі становлять $1/3$ його змінних втрат. Визначити ККД двигуна після його переходу в однофазний режим внаслідок обриву однієї з фаз статора, якщо його змінні втрати збільшилися в 2 рази, а корисне навантаження на валу залишилося незмінним.

34. Однофазний асинхронний двигун повинен запускатися від мережі із напругою $U_1 = 220$ В за допомогою конденсатора, підключеного в коло пускової обмотки. Параметри робочої обмотки в режимі пуску $R_{кА} = X_{кА} = 5$ Ом, а активний опір пускової обмотки $R_{кА} = R_{кВ}$. Визначити ємність конденсатора, необхідну для створення при запуску кругового обертового магнітного поля, якщо обидві обмотки мають однакову кількість витків і однакові обмоткові коефіцієнти.

35. Визначити величину пускового струму, який споживається однофазним асинхронним конденсаторним двигуном з мережі, якщо повні опори робочої й пускової обмоток відповідно $Z_{кА} = 7,2$ Ом і $Z_{кВ} = 8,5$ Ом. Напруга мережі $U_1 = 220$ В. Магнітне поле, яке утворюється при запуску двигуна, – кругове. Зобразити векторну діаграму двигуна при пуску.

36. Визначити пусковий струм, який споживається з мережі однофазним асинхронним двигуном з пусковою обмоткою, якщо опір робочої й

пускової обмоток відповідно $Z_{кА} = 7,2 \cdot e^{j45^\circ}$ Ом, $Z_{кВ} = 7,2 \cdot e^{j15^\circ}$ Ом, а напруга мережі $U_1 = 220$ В. Навести векторну діаграму двигуна при пуску.

37. Знайдіть значення активних і реактивних складових опору пускової обмотки однофазного асинхронного двигуна з пусковою обмоткою, які забезпечили б кут зсуву між струмами пускової й робочої обмоток 30° при однакових значеннях пускових струмів в кожній з них. Повний опір робочої обмотки при пуску $Z_{кА} = 7,2 \cdot e^{j45^\circ}$ Ом, а напруга мережі $U_1 = 220$ В.

38. Трифазний асинхронний двигун зі з'єднанням статорної обмотки в зірку працює в номінальному режимі при напрузі мережі $U_{1н} = 380$ В і споживаному струмі $I_{1н} = 3,52$ А при $\cos\phi_{1н} = 0,82$. Яка корисна потужність повинна бути на валу двигуна після обриву однієї з фаз обмотки статора, щоб струм залишився незмінним, якщо швидкість обертання ротора стала $n_2 = 2850$ об/хв? Активний опір однієї з фаз статора $R_1 = 3,4$ Ом, магнітні втрати становлять половину від електричних втрат статора в трифазному режимі, а механічні втрати – половину від магнітних. Додатковими втратами знехтувати.

39. Показати, що буде з магнітними втратами ротора трифазного асинхронного двигуна після обриву однієї фази статорної обмотки при незмінному корисному навантаженні на валу.

40. Трифазний асинхронний двигун в номінальному режимі споживає з мережі струм $I_1 = 3,52$ А при $\cos\phi_{1н} = 0,82$. Визначити повний струм після обриву однієї фази його обмотки при незмінному корисному навантаженні на валу, а також його активну й реактивну складову, якщо відомо, що реактивна складова струму не змінюється.

2.2 Основні формули

Швидкість обертання магнітного поля (в об/хв):

$$n_1 = \frac{60 f_1}{p}, \quad (2.1)$$

де f_1 – частота струму статора, Гц.

p – кількість пар полюсів.

Ковзання:

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} = \frac{\omega_1 - \omega}{\omega_1}, \quad (2.2)$$

де n – швидкість обертання ротора;

ω_1 – кутова швидкість обертання магнітного поля, рад/с;

ω – кутова швидкість обертання ротора, рад/с.

Зв'язок між кутовою швидкістю та швидкістю обертання:

$$\omega = \frac{2\pi n}{60}. \quad (2.3)$$

Частота струму в обмотці ротора:

$$f_2 = p(n_1 - n) = spn_1 = sf_1. \quad (2.4)$$

ЕРС, що індукуються в обмотках статора E_1 і ротора E_2 :

$$E_1 = 4,44 f_1 w_1 k_{об1} \Phi, \quad (2.5)$$

$$E_2 = 4,44 f_1 w_2 k_{об2} k_c \Phi, \quad (2.6)$$

де w_1, w_2 – число витків однієї фази обмотки статора і ротора, відповідно;

k_c – коефіцієнт скосу пазів обмотки ротора;

Φ – магнітний потік;

$k_{o\delta 1}, k_{o\delta 2}$ – обмоткові коефіцієнти обмотки статора і ротора, відповідно:

$$k_{o\delta} = k_y k_p, \quad (2.7)$$

де k_y – коефіцієнт укорочення обмотки;

k_p – коефіцієнт розподілу обмотки.

Коефіцієнт трансформації ЕРС:

$$k_E = \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1 k_{o\delta 1}}{w_2 k_{o\delta 2} k_c}. \quad (2.8)$$

Нехтуючи різницею обмотувальних коефіцієнтів, величини яких знаходяться в межах 0,96 – 0,90, а коефіцієнт скосу k_c обмотки ротора наближається до одиниці, можна вважати:

$$k_E \approx \frac{w_1}{w_2}. \quad (2.9)$$

Коефіцієнт приведення струмів:

$$k_i = \frac{m_1 w_1 k_{o\delta 1}}{m_2 w_2 k_{o\delta 2} k_c}. \quad (2.9)$$

Приведені величини вторинної обмотки:

– струм

$$I'_2 = \frac{m_2 E_2}{m_1 E'_2} I_2 = \frac{m_2 w_2 k_{o\delta 2} k_c}{m_2 w_2 k_{o\delta 1}} I_2 = \frac{I_2}{k_i}; \quad (2.10)$$

– активний опір

$$R'_2 = \frac{m_2 I_2}{m_1 I'_2} R_2 = k_i k_E R_2 = k R_2, \quad (2.11)$$

де k – коефіцієнт приведення опорів:

$$k = k_i k_E; \quad (2.12)$$

– індуктивний опір

$$X'_2 = \frac{E'_2 I_2}{E_2 I'_2} X_2 = k_i k_E X_2 = k X_2. \quad (2.13)$$

ЕРС в обмотці ротора при його обертанні:

$$E_{2s} = 4,44 f_2 w_2 k_{ob} k_c \Phi = 4,44 f_1 s w_2 k_{ob} k_c \Phi. \quad (2.14)$$

Зв'язок між ЕРС АМ при роторі, що обертається, та нерухомому роторі:

$$E_{2s} = E_2 s. \quad (2.15)$$

Струм, що протікає в обмотці ротора:

$$I_2 = \frac{E_{2s}}{Z_2} = \frac{E_{2s}}{\sqrt{R_2^2 + X_{2s}^2}}, \quad (2.16)$$

де Z_2 – повний опір обмотки ротора;

R_2, X_{2s} – активний та реактивний опори обмотки ротора, відповідно, де

$$X_{2s} = 2\pi f_2 L_2 = 2\pi f_1 L_2 s = X_2 s, \quad (2.17)$$

де L_2 – індуктивність обмотки ротора.

Для розуміння процесу перетворення енергії в асинхронному двигуні на рис. 2.1 показана енергетична діаграма активної потужності.

Електричні втрати в обмотці статора:

$$\Delta p_{el1} = m_1 I_1^2 R_1. \quad (2.18)$$

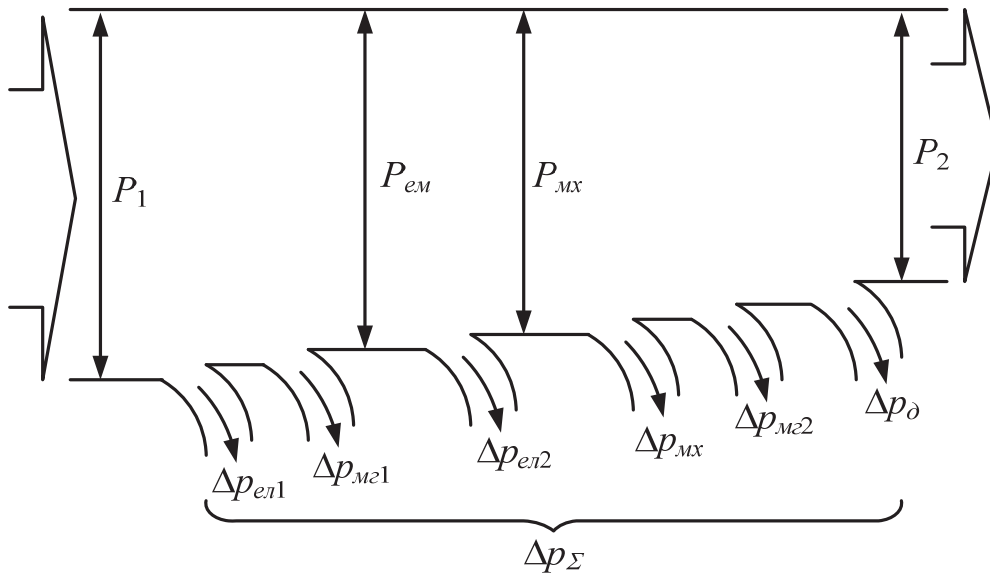


Рисунок 2.1 – Енергетична діаграма активної потужності асинхронного двигуна

Магнітні втрати в сердечнику статора:

$$\Delta p_{мг1} = m_1 I_0^2 R_m = \frac{m_1 E_1^2}{R_m}. \quad (2.19)$$

Електромагнітна потужність:

$$P_{ем} = P_1 - \Delta p_{ел1} - \Delta p_{мг1} \quad (2.20)$$

або

$$P_{ем} = m_1 I_2'^2 \frac{R_2'}{s} = m_2 I_2^2 \frac{R_2}{s}. \quad (2.21)$$

Електричні втрати в обмотці ротора:

$$\Delta p_{ел2} = m_1 I_2'^2 R_2' = m_2 I_2^2 R_2. \quad (2.22)$$

Механічна потужність асинхронного двигуна:

$$P_{мх} = P_{ем} - \Delta p_{ел2} \quad (2.23)$$

або

$$P_{mx} = m_1 I_2'^2 R_2' \frac{1-s}{s} = m_2 I_2^2 R_2 \frac{1-s}{s}. \quad (2.24)$$

Корисна потужність асинхронного двигуна:

$$P_2 = P_{mx} - \Delta p_{mx} - \Delta p_{m\epsilon 2} - \Delta p_{\partial}, \quad (2.25)$$

де Δp_{∂} – додаткові втрати.

Сумарні втрати асинхронного двигуна:

$$\Delta p_{\Sigma} = \Delta p_{el1} + \Delta p_{m\epsilon 1} + \Delta p_{el2} + \Delta p_{mx} + \Delta p_{m\epsilon 2} + \Delta p_{\partial}. \quad (2.26)$$

ККД асинхронного двигуна:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Delta p_{\Sigma}} = 1 - \frac{\Delta p_{\Sigma}}{P_1}, \quad (2.27)$$

де P_1 – потужність, що споживається з мережі:

$$P_1 = 3U_1 I_1 \cos \phi_1, \quad (2.28)$$

де ϕ_1 – кут між напругою та струмом обмотки статора.

Електричні втрати в обмотці ротора та механічну потужність, відповідно, можна подати ще й у такому вигляді:

$$\Delta p_{el2} = sP_{em}, \quad (2.29)$$

$$P_{mx} = (1-s)P_{em}. \quad (2.30)$$

Потужність ковзання:

$$P_s = sP_{em}. \quad (2.31)$$

Коефіцієнт навантаження:

$$\beta = \frac{P_2}{P_{2H}}, \quad (2.32)$$

де P_{2H} – номінальна потужність АД.
Номінальний ККД:

$$\eta_H = \frac{P_{2H}}{P_{2H} + \Delta p_{\text{пост}} + \Delta p_{\text{зм}}}, \quad (2.33)$$

де $\Delta p_{\text{пост}}$ – постійні втрати:

$$\Delta p_{\text{пост}} = \Delta p_{\text{м21}} + \Delta p_{\text{м22}} + \Delta p_{\text{мх}}; \quad (2.34)$$

$\Delta p_{\text{зм}}$ – змінні втрати:

$$\Delta p_{\text{зм}} = \Delta p_{\text{ел1}} + \Delta p_{\text{ел2}} + \Delta p_{\text{д}}. \quad (2.35)$$

ККД асинхронного двигуна для будь-якого навантаження:

$$\eta = \frac{\beta P_{2H}}{\beta P_{2H} + \Delta p_{\text{пост}} + \Delta p_{\text{зм}}}. \quad (2.36)$$

Енергетична діаграма реактивної потужності асинхронного двигуна показана на рис. 2.2.

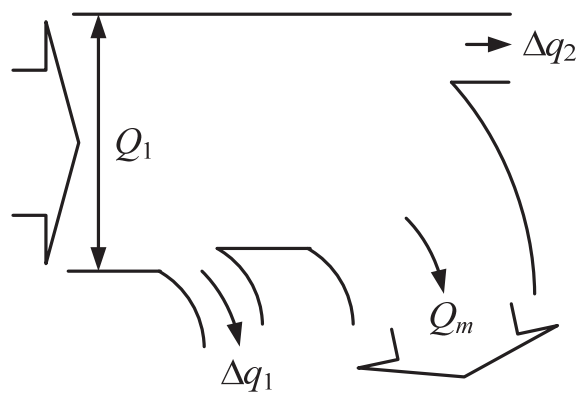


Рисунок 2.2 – Енергетична діаграма перетворення реактивної потужності в асинхронному двигуні

Реактивна потужність, яка споживається з мережі:

$$Q_1 = m_1 U_1 I_1 \sin \varphi_1. \quad (2.37)$$

Реактивна потужність, що витрачається на створення полів розсіювання первинного кола:

$$\Delta q_1 = m_1 I_1^2 X_{\sigma 1}, \quad (2.38)$$

де $X_{\sigma 1}$ – індуктивний опір, обумовлений потоком розсіювання в обмотці статора.

Потужність, що витрачається на створення основного магнітного поля машини:

$$Q_{m\epsilon} = m_1 I_0^2 X_m. \quad (2.39)$$

Потужність, що витрачається на створення вторинних полів розсіювання:

$$\Delta q_2 = m_2 I_2^2 X_{\sigma 2}. \quad (2.40)$$

Баланс реактивних потужностей в асинхронному двигуні:

$$Q_1 = Q_m + \Delta q_1 + \Delta q_2. \quad (2.41)$$

Електромагнітний момент можна записати через:

– електромагнітну потужність P_{em}

$$M = \frac{P_{em}}{\omega}; \quad (2.42)$$

– ковзання

$$M = \frac{\Delta p_{el2}}{\omega_1 s}; \quad (2.43)$$

– параметри схеми заміщення

$$M = \frac{m_1 U_1^2 \frac{R'_2}{s}}{\omega_1 \left[\left(R_1 + C_1 \frac{R'_2}{s} \right)^2 + (X_1 + C_1 X'_2)^2 \right]}, \quad (2.44)$$

де враховано, що

$$I'_2 = \frac{U_1}{\sqrt{\left(R_1 + C_1 \frac{R'_2}{s} \right)^2 + (X_1 + C_1 X'_2)^2}}, \quad (2.45)$$

де C_1 – комплексне число:

$$C_1 = 1 + \frac{R_1 + jX_1}{R_m + jX_m}, \quad (2.46)$$

де R_m, X_m – активний та індуктивний опори вітки намагнічування, відповідно.

Наближено можна прийняти $C_1 \approx 1$.

Електромагнітний момент можна також виразити через:

– струм кола ротора

$$M = \frac{pm_2 R_2 I_2^2}{\omega_1 s} = \frac{pm_1 R'_2 I_2'^2}{\omega_1 s}; \quad (2.47)$$

– активну складову струму ротора I_{2a} :

$$M = c_m \Phi I_{2a}, \quad (2.48)$$

де c_m – стала машини:

$$c_m = \frac{pm_2 k_{об2}}{\sqrt{2}}. \quad (2.49)$$

Формула Клосса:

$$\frac{M}{M_{\max}} = \frac{2 + as_{кр}}{\frac{s}{s_{кр}} + \frac{s_{кр}}{s} + 2s_{кр}}, \quad (2.50)$$

де $s_{кр}$ – критичне ковзання;

a – коефіцієнт, що визначається як

$$a = \frac{2R_1}{C_1 R_2'}. \quad (2.51)$$

Наближено можна вважати $a \approx 2$.

Спрощена формула Клосса:

$$\frac{M}{M_{\max}} \approx \frac{2}{\frac{s}{s_{кр}} + \frac{s_{кр}}{s}}. \quad (2.52)$$

Критичне ковзання:

$$s_{кр} = \pm \frac{C_1 R_2'}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + C_1 X_2')^2}}, \quad (2.53)$$

$$s_{кр} = s_{ном} (\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}), \quad (2.54)$$

де λ – перевантажувальна здатність:

$$\lambda = M_{\max} / M_{ном}. \quad (2.55)$$

Максимальний момент:

$$M_{\max} = \pm \frac{m_1 U_1^2}{2\omega_1 C_1 \left[\pm R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_1 + C_1 X_2')^2} \right]}, \quad (2.56)$$

де знак «+» відноситься до двигунного режиму роботи, а знак «-» – до генераторного.

Пусковий момент:

$$M_n = \frac{m_1 U_1^2 R'_2}{\omega_1 [(R_1 + C_1 R'_2)^2 + (X_1 + C_1 X'_2)^2]}. \quad (2.57)$$

Коефіцієнт потужності в режимі холостого ходу:

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{m_1 U_1 I_0}, \quad (2.58)$$

де P_0 – активна потужність, що споживається з мережі в режимі холостого ходу;

I_0 – струм холостого ходу.

Коефіцієнт потужності в режимі короткого замикання:

$$\cos \varphi_k = \frac{P_{1k}}{m_1 U_{k1} I_{1k}}, \quad (2.59)$$

де P_{1k} – активна потужність, що споживається з мережі в режимі короткого замикання;

U_{1k} – напруга короткого замикання;

I_{1k} – струм короткого замикання.

Повний опір короткого замикання:

$$Z_k = \frac{U_{1k}}{I_{1k}}. \quad (2.60)$$

Активний опір короткого замикання:

$$R_k \approx \frac{P_k}{m_1 I_{1k}^2}. \quad (2.61)$$

Індуктивний опір короткого замикання:

$$X_{\kappa} \approx \sqrt{Z_{\kappa}^2 - R_{\kappa}^2}. \quad (2.62)$$

Опори обмотки статора та приведеної обмотки ротора:

$$\begin{cases} Z_1 \approx Z'_2 \approx \frac{Z_{\kappa}}{2}, \\ R_1 \approx R'_2 \approx \frac{R_{\kappa}}{2}, \\ X_1 \approx X'_2 \approx \frac{X_{\kappa}}{2}. \end{cases} \quad (2.63)$$

Кратність пускового моменту:

$$\frac{M_n}{M_{ном}} = k_n. \quad (2.64)$$

Співвідношення між параметрами асинхронного двигуна в однофазному (1) та трифазному (3) режимах:

– потужність, що споживається двигуном з мережі

$$\begin{aligned} P_{1(1)} &= U_{\text{л}} I_{1(1)} \cos \varphi_{1(1)}, \\ P_{1(3)} &= \sqrt{3} U_{\text{л}} I_{1(3)} \cos \varphi_{1(3)}; \end{aligned} \quad (2.65)$$

– корисна потужність на валу

$$\begin{aligned} P_{2(1)} &= P_{1(1)} \eta_{(1)} = U_{\text{л}} I_{1(1)} \cos \varphi_{1(1)} \eta_{(1)}, \\ P_{2(3)} &= P_{1(3)} \eta_{(3)} = \sqrt{3} U_{\text{л}} I_{1(3)} \cos \varphi_{1(3)} \eta_{(3)}; \end{aligned} \quad (2.66)$$

– струм, що споживається з мережі,

$$I_{1(1)} = \sqrt{3} I_{1(3)}; \quad (2.67)$$

– коефіцієнт потужності

$$\cos \varphi_{1(1)} = \frac{I_{1a(1)}}{I_{1(1)}} > \cos \varphi_{1(3)} = \frac{I_{1a(3)}}{I_{1(3)}}. \quad (2.68)$$

Послідовність аналітичного методу розрахунку робочих характеристик асинхронного двигуна:

– приведений активний опір ротора:

$$R'_2 = R_k - R_1; \quad (2.69)$$

– критичне ковзання:

$$s_{кр} \approx \frac{R'_2}{X_k}; \quad (2.70)$$

– номінальне ковзання за формулою (2.2);

– задавшись рядом значень ковзання, визначають необхідні величини:

1) еквівалентний активний опір схеми заміщення

$$R_e = R_1 + \frac{R'_2}{s}; \quad (2.71)$$

2) еквівалентний повний опір схеми заміщення

$$Z_e = \sqrt{R_e^2 + X_k^2}; \quad (2.72)$$

3) коефіцієнт потужності робочого контуру схеми заміщення:

$$\cos \varphi_2 = \frac{R_e}{Z_e}; \quad (2.73)$$

4) приведений струм ротора

$$I'_2 = \frac{U_1}{Z_e}; \quad (2.74)$$

5) активна складова струму ротора

$$I'_{2a} = I'_2 \cos \varphi_2; \quad (2.75)$$

6) реактивна складова струму ротора

$$I'_{2p} = I'_2 \sin \varphi_2; \quad (2.76)$$

7) активна складова струму статора

$$I_{1a} = I_{0a} + I'_{2a}, \quad (2.77)$$

де I_{0a} – активна складова струму холостого ходу:

$$I_{0a} = I_0 \cos \varphi_0; \quad (2.78)$$

8) реактивна складова струму статора

$$I_{1p} = I_{0p} + I'_{2p}, \quad (2.79)$$

де I_{0p} – реактивна складова струму холостого ходу:

$$I_{0p} = I_0 \sin \varphi_0; \quad (2.80)$$

9) струм в обмотці статора

$$I_1 = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1p}^2}; \quad (2.81)$$

10) коефіцієнт потужності

$$\cos \varphi_1 = \frac{I_{1a}}{I_1}; \quad (2.82)$$

11) потужність, що споживається з мережі

$$P_1 = m_1 U_1 I_{1a}; \quad (2.83)$$

12) електричні втрати в статорі за формулою (2.18);

- 13) електромагнітна потужність за формулою (2.21);
 14) електромагнітний момент за формулою (2.42);
 15) електричні втрати в роторі за формулою (2.29);
 16) додаткові втрати за формулою

$$\Delta p_{\partial.n} = 0,005 P_{1n}, \quad (2.84)$$

де $\Delta p_{\partial.n}$ – додаткові втрати при номінальному навантаженні,

$$\Delta p'_{\partial} = \Delta p_{\partial.n} \beta^2, \quad (2.85)$$

де $\Delta p'_{\partial}$ – додаткові втрати при відповідному навантаженні;

- 17) корисна потужність на валу

$$P_2 = P_{em} - \Delta p_{el2} - \Delta p_{mx} - \Delta p'_{\partial}, \quad (2.86)$$

де механічні втрати Δp_{mx} визначаються з досліду холостого ходу;

- 18) ККД розраховують за формулою (2.27);
 19) частота обертання за формулою

$$n = (1 - s)n_1; \quad (2.87)$$

- 20) корисний момент на валу

$$M_2 = 9,55 \frac{P_2}{n_2}. \quad (2.88)$$

3 СИНХРОННІ МАШИНИ

Рекомендована література [3, 6, 9].

3.1 Задачі

1. Трифазний синхронний генератор має такі номінальні величини: $P_n = 48$ кВт; $U_{лн} = 0,23$ кВ; $\cos\varphi_n = 0,85$; $ВКЗ = 1,6$; $x_{\sigma\alpha^*} = 0,125$. Визначити опори x_d , x_{ad} , $x_{\sigma\alpha}$ в фізичних та відносних одиницях при з'єднанні обмотки статора в зірку.

2. Трифазний синхронний генератор з номінальною потужністю $P_n = 600$ кВт, номінальною напругою $U_{лн} = 0,4$ кВ при з'єднанні обмотки статора в зірку працює на індуктивно-активне навантаження при $\cos\varphi_n = 0,85$. Генератор має $ВКЗ = 0,5$ та $x_{\sigma\alpha^*} = 0,08$. Визначити фазну напругу синхронного генератора, фазний і лінійний струм, ЕРС розсіювання $E_{\sigma\alpha}$, опори x_d та x_{ad} в абсолютних і відносних одиницях.

3. Трифазний синхронний генератор в номінальному режимі споживає від приводного двигуна (турбіни) $P_{1н} = 500000$ кВт при $U_{лн} = 20$ кВ віддає в навантаження струм $I_n = 14300$ А при $\cos\varphi_n = 0,86$. Визначити номінальну потужність синхронного генератора P_n , сумарні втрати, номінальний і максимальний ККД, якщо відомо, що постійні втрати становлять 25% від змінних втрат в номінальному режимі.

4. В одній фазі трифазного синхронного генератора виміряна величина активної потужності становить $P_{\phi_n} = 4$ кВт, $U_{\phi_n} = 230$ В, струм $I_{\phi_n} = 22$ А. Визначити активну, повну і реактивну потужності генератора, а також активну й реактивну складові струму статора.

5. Трифазний двополосний турбогенератор з діаметром розточки статора $D = 0,8$ м обертається зі швидкістю $n_n = 3600$ об/хв. Визначити величину полюсного поділу статора й частоту напруги генератора.

6. Трифазний синхронний генератор має такі номінальні дані: $P_n = 640000$ кВт; $U_{лн} = 24$ кВ; $\cos\varphi_n = 0,8$; $\eta_n = 0,97$; $ВКЗ = 0,4$; $x_{\sigma\alpha^*} = 0,25$. Визначити втрати генератора, повний струм статора (лінійний), його активну й реактивну складову, постійні та змінні втрати, якщо відомо, що $\Delta p_{пост} = 0,3\Delta p_{змін}$.

7. Трифазний синхронний генератор працює на навантаження при $U_{лн} = 6,3$ кВ, $\cos\varphi_n = 0,8$, віддає в навантаження струм $I_n = 1380$ А. Визначити повну потужність, її активну й реактивну складові, повний опір однієї

фази навантаження, його активну й реактивну складові при з'єднанні обмотки статора в зірку.

8. Номінальна фазна напруга синхронного генератора $U_{\phi n} = 500$ В, струм $I_{\phi n} = 290$ А, синхронний індуктивний опір по повздовжній осі $x_d = 1,384$ Ом. Визначити ВКЗ генератора й струм короткого замикання при одиничному струмі збудження.

9. Трифазний турбогенератор має з'єднання обмотки статора в зірку, працює в номінальному режимі при $I_n = 10600$ А та $U_{\text{лн}} = 20$ кВ на активне навантаження. Визначити лінійну напругу на затискачах обмотки статора після вимкнення навантаження, якщо $x_{c^*} = 1,2$.

10. Трифазний синхронний генератор, що має з'єднання обмотки статора в зірку, працює паралельно з мережею при $U_{\phi n} = 660$ В та $\cos\varphi_n = 0,6$, споживає з мережі реактивний струм $I_p = 60$ А. Визначити, в якому режимі збудження працює генератор, а також знайти повну, активну та реактивну потужності генератора.

11. Трифазний синхронний генератор, що має з'єднання обмотки статора в зірку, працює паралельно з мережею в режимі надзбудження при $U_{\text{лн}} = 0,4$ кВ і завантажений активним струмом $I_a = 30$ А та реактивним струмом $I_p = 40$ А. Визначити повну потужність синхронного генератора, його активні й реактивні складові, напрям їх передачі та коефіцієнт потужності.

12. Трифазний синхронний генератор, що має з'єднання обмотки статора в зірку, працює паралельно з мережею в режимі надзбудження при струмі статора $I = 100$ А та $\cos\varphi_n = 0,8$. Визначити струм статора в режимі, коли $\cos\varphi = 1$. Що треба змінити в генераторі для його переходу в даний режим?

13. Трифазний двополюсний турбогенератор працює паралельно з мережею в номінальному режимі при $f = 50$ Гц; $U_n^* = 1$; $E_0^* = 1,95$; $x_{c^*} = 1,5$. Побудувати кутову характеристику генератора $M^* = f(\Theta)$ у відносних одиницях та показати в ній Θ_n , $\Theta_{кр}$. Визначити статичну перевантаженість генератора.

14. В момент вимкнення неявнополюсного синхронного генератора вектор ЕРС генератора був зсунутий за фазою відносно вектора напруги мережі на кут $\alpha = 210^\circ$. Знайти відносне значення струму статора генератора в момент вмикання, якщо $E_0^* = U_n^* = 1,0$ та $x_d^* = 2,0$.

15. Неявнополюсний синхронний генератор працює паралельно з мережею в номінальному режимі при $x_d^* = 1,6$, $E_0^* = 2,4$. Визначити номінальні значення кута навантаження Θ_n та статичну перевантаженість.

16. Неявнополюсний синхронний генератор працює паралельно з мережею при $U_{\phi n} = 230$ В і віддає до мережі активний струм $I_a = 40$ А та реактивний $I_p = 30$ А. Синхронний індуктивний опір $X_c = 1,5$ Ом. Визначити ЕРС генератора E_0 та кут навантаження Θ (через векторну діаграму та розрахунком).

17. При вмиканні чотирьополусного синхронного генератора на паралельну роботу з мережею частоти $f_n = 50$ Гц, швидкість обертання ротора доведена до 1497 об/хв. Визначити різницю частот мережі та генератора, період зміни різниці напруги і її амплітуду, якщо $U_{\Gamma} = E_{0\Gamma} = U_m = 230$ В. Розрахувати також ковзання ротора генератора відносно синхронної швидкості.

18. Трифазний гідрогенератор з $P_n = 20$ МВт при $U_{\text{лн}} = 6,6$ кВ та струмі $I_n = 2180$ А працює паралельно з мережею в номінальному режимі при $\Theta_n = 30^\circ$. Схема статора – «зірка». Побудувати кутову характеристику, якщо $x_d = 2,0$ Ом і $x_q = 1,25$ Ом.

19. Визначити максимальну потужність явнополусного синхронного генератора при паралельній роботі з мережею, якщо відомі $x_d = 3,92$ Ом, $x_q = 2,37$ Ом, $U_{\text{лн}} = 10,5$ кВ, а лінійна основна ЕРС при номінальному струмі збудження $E_{0n} = 23,4$ кВ. Чому дорівнює максимальна потужність неявнополусної машини при відсутності збудження в ній? Схема з'єднання обмотки статора – зірка.

20. Шестиполусний синхронний двигун має $P_n = 6300$ кВт, $U_{\text{лн}} = 6$ кВ, частоту $f_m = 50$ Гц, $\cos\phi_n = 0,9$ (випереджаючий), ККД $\eta_n = 0,971$. Визначити номінальний обертовий момент, струм якоря, споживану активну та реактивну потужності (обґрунтувати, споживається вона з мережі чи навпаки).

21. Визначити максимальний момент, який може розвинути синхронний двигун при перевантаженні, якщо в номінальному режимі при $\Theta_n = 23^\circ$ він розвиває номінальний момент $M_n = 78$ Н·м.

22. Восьмиполусний синхронний двигун з $P_n = 75$ кВт має кратність максимального моменту 1,65. Визначити (без урахування явнополусності) максимальний момент, за якого двигун ще утримується в синхронізмі, якщо струм збудження його зменшити до $0,5I_{\text{збн}}$. Частота мережі $f_m = 50$ Гц.

23. Трифазний шестиполусний неявнополусний синхронний двигун працює від мережі змінної напруги з $U_{\text{лн}} = 800$ В при $f = 50$ Гц. Його ЕРС $E_0 = 900$ В. Задані $x_c = x_d = 1,5$ Ом, статична перевантаженість $k_m = 2,5$. Визначити максимальний момент двигуна.

24. Трифазний синхронний двигун, який має $P_n = 3600$ кВт, працює в режимі холостого ходу при $U_{лн} = 6$ кВ та $\cos\varphi_n = 1$. Визначити споживану двигуном потужність, якщо механічні втрати при номінальному режимі дорівнюють 62 кВт, магнітні втрати $\Delta p_m = 80$ кВт, потужність, яка споживається збудником, з'єднаним з валом двигуна, становить 15 кВт, опір обмотки якоря 1,2 Ом, з'єднання обмоток – зірка. Додаткові втрати взяти рівними 0,5% від номінальної потужності.

25. Явнополісний синхронний двигун номінальною потужністю $P_n = 250$ кВт працює при $U_{фн} = 6,6$ кВ та має $x_d = 2,3$ Ом, $x_q = 1,8$ Ом. Яку найбільшу потужність він може розвивати при втраті збудження?

26. Знято три значення струму статора синхронного двигуна, що працює при постійній активній потужності в режимі надзбудження: 60 А, 80 А та 100 А. Перше значення відповідає мінімуму U -подібної характеристики синхронного двигуна. Визначити активну та реактивну складові струмів для всіх трьох значень.

27. Визначити електромагнітну потужність і електромагнітний момент синхронного двигуна, якщо споживана з мережі активна потужність $P_1 = 6000$ кВт, струм $I_n = 200$ А; активний опір обмотки якоря $R_a = 0,8$ Ом, магнітні втрати $\Delta p_m = 90$ кВт, частота мережі $f = 50$ Гц, кількість полюсів $2p = 4$.

28. Чотиріполюсний синхронний двигун має $P_{1n} = 6800$ кВт, $\eta_n = 0,971$, $\cos\varphi_n = 0,9$ та $U_{лн} = 6$ кВ. Визначити струм якоря двигуна й номінальний обертовий момент при $f = 50$ Гц.

29. Визначити величину ЕРС збудження турбогенератора в режимі номінального навантаження при номінальній напрузі $U_{нф} = 230$ В, номінальному струмі $I_n = 1800$ А та коефіцієнті потужності $\cos\varphi = 0,8$. Активний опір фази обмотки якоря $R_a = 0,00162$ Ом. Повний індуктивний опір обмотки якоря $X_c = 0,211$ Ом. Впливом насичення знехтувати. Побудувати діаграму напруг генератора.

30. Турбогенератор збуджений таким чином, що при навантаженні $I = 2150$ А, $\cos\varphi = 0,3$ лінійна напруга на його затискачах $U_{нл} = 0,4$ кВ. Обмотки генератора з'єднані в зірку. Без врахування насичення визначити ЕРС збудження машини, якщо активний і головний індуктивний опори обмотки якоря $R_a = 0,0015$ Ом, $X_c = 0,211$ Ом, індуктивний опір розсіювання обмотки якоря $X_\sigma = 0,015$ Ом.

31. Нехтуючи зміною потоку розсіювання при навантаженні, визначити струм збудження генератора в навантажувальному режимі $I_n = 700$ А, $U_{нл} = 6,3$ кВ для коефіцієнта потужності $\cos\varphi = 0$, якщо струм збудження в

режимі холостого ходу $I_{зб} = 132$ А, а генератора має в даній ділянці нормальну (лінійну) характеристику холостого ходу. Індуктивний опір розсіювання обмотки якоря $X_c = 1,06$ Ом. Головний індуктивний опір обмотки якоря $X_c = 12,8$ Ом. Активним опором обмотки якоря знехтувати. Обмотка статора з'єднана в зірку.

32. Коефіцієнт корисної дії турбогенератора $\eta = 0,972$. Номінальна лінійна напруга $U_{нл} = 10500$ В, номінальний фазний струм $I_n = 1700$ А, номінальний коефіцієнт потужності $\cos\varphi_n = 0,8$. Повні втрати генератора рівні 721 кВт. Визначити обертальний момент турбіни, якщо кутова швидкість ротора $\omega = 314$ рад/с.

33. Обертальний момент турбіни, що приводить в рух двополюсний турбогенератор, $M = 81910$ Н·м, активна потужність, що видається генератором, $P_n = 25$ МВт. Визначити механічну потужність, що витрачається на обертання збудника, з'єданого з валом генератора, якщо механічні втрати в машині $\Delta p_{мех} = 400$ кВт, повні магнітні втрати (на перемагнічування, вихрові струми та додаткові втрати від вищих гармонік магнітної індукції в зубцевій зоні магнітопроводу) $\Delta p_{маг} + \Delta p_{дод} = 150$ кВт, повні електричні втрати $\Delta p_{ел} = 45$ кВт. Частота струму $f = 50$ Гц.

34. Струм збудження синхронного генератора в номінальному режимі ($S_n = 26$ МВА, $\cos\varphi_n = 0,8$) $I_{збн} = 860$ А, опір обмотки збудження $R_{зб} = 0,232$ Ом, ККД збудника $\eta_{зб} = 0,85$. Визначити обертальний момент приводної турбіни, якщо сума повних і магнітних втрат становить 324 кВт, а механічні втрати дорівнюють половині втрат в обмотці збудження. Кутова швидкість обертання ротора $\omega = 13,08$ рад/с.

35. Визначити підведену механічну потужність і ККД чотириполюсного синхронного генератора при номінальному навантаженні з $U_{нф} = 230$ В, $I_n = 60$ А, $\cos\varphi_n = 0,8$, якщо повні магнітні втрати – 760 Вт, повні електричні втрати – 1800 Вт, а механічні втрати дорівнюють 1/3 від електричних втрат. Втрати на збудження покриваються за рахунок незалежного джерела збудження. Чому дорівнює електромагнітний момент машини, якщо частота струму $f = 50$ Гц?

36. Шестиполюсний синхронний двигун має номінальну потужність $P_n = 6300$ кВт, номінальна напруга мережі $U_{н.лін} = 6$ кВ, частота струму $f = 50$ Гц, коефіцієнт потужності $\cos\varphi = 0,8$. Двигун працює з перезбудженням, його ККД $\eta = 0,971$. Визначити номінальний обертальний момент, струм якоря, активну та реактивну потужності, що споживаються двигуном.

3.2 Основні формули

ЕРС при роботі генератора під навантаженням:

$$\dot{E} = \dot{E}_0 + \dot{E}_a, \quad (3.1)$$

де \dot{E}_0 – ЕРС холостого ходу;

\dot{E}_a – ЕРС реакції якоря:

$$\dot{E}_a = -jI_a X_a, \quad (3.2)$$

де I_a – струм якоря;

X_a – індуктивний опір обмотки якоря.

У машині з явновираженими полюсами ЕРС якоря:

$$\dot{E}_a = \dot{E}_{ad} + \dot{E}_{aq}, \quad (3.3)$$

де \dot{E}_{ad} – ЕРС реакції якоря по поздовжній осі:

$$\dot{E}_{ad} = -j\dot{I}_d X_{ad}, \quad (3.4)$$

де X_{ad} – індуктивний опір реакції якоря по поздовжній осі;

\dot{I}_d – струм якоря по поздовжній осі:

$$I_d = I_a \cdot \sin(\psi), \quad (3.5)$$

де ψ – кут між ЕРС холостого ходу E_0 і струмом якоря;

$$\dot{E}_{aq} = -j\dot{I}_q X_{aq}, \quad (3.6)$$

де \dot{E}_{aq} – ЕРС реакції якоря по поперечній осі:

$$\dot{E}_{aq} = -j\dot{I}_q X_{aq}, \quad (3.7)$$

де X_{aq} – індуктивний опір реакції якоря по поперечній осі;

I_q – струм якоря по поперечній осі:

$$I_q = I_a \cdot \cos(\psi). \quad (3.8)$$

ЕРС, індукована в обмотці якоря потоком розсіювання:

– для неявнополюсної машини

$$\dot{E}_{\sigma a} = -j\dot{I}_a X_{\sigma a}, \quad (3.9)$$

де $X_{\sigma a}$ – опір розсіювання обмотки якоря;

– для явнополюсної машини

$$\dot{E}_{\sigma a} = \dot{E}_{\sigma ad} + \dot{E}_{\sigma aq}, \quad (3.10)$$

де $\dot{E}_{\sigma ad}$ – ЕРС, індукована в обмотці якоря потоком розсіювання по поздовжній осі:

$$\dot{E}_{\sigma ad} = -j\dot{I}_d X_{\sigma a}, \quad (3.11)$$

де $\dot{E}_{\sigma aq}$ – ЕРС, індукована в обмотці якоря потоком розсіювання по поперечній осі:

$$\dot{E}_{\sigma aq} = -j\dot{I}_q X_{\sigma a}. \quad (3.12)$$

ЕРС неявнополюсної машини:

– по поздовжній осі:

$$\dot{E}_d = \dot{E}_{ad} + \dot{E}_{\sigma ad}; \quad (3.13)$$

– по поперечній осі

$$\dot{E}_q = \dot{E}_{aq} + \dot{E}_{\sigma aq}. \quad (3.14)$$

Повний або синхронний індуктивний опір неявнополюсної машини:

$$X_c = X_a + X_{\sigma a}. \quad (3.15)$$

Повний або синхронний індуктивний опір явнополюсної машини:
– по повздовжній осі

$$X_d = X_{ad} + X_{\sigma a}; \quad (3.16)$$

– по поперечній осі:

$$X_q = X_{aq} + X_{\sigma a}. \quad (3.17)$$

Для явнополюсної машини:

$$X_c = X_d = X_q. \quad (3.18)$$

Відношення короткого замикання (ВКЗ):

$$BKZ = i_{f0.n} / i_{fk.n}, \quad (3.19)$$

де $i_{f0.n}$ – струм збудження, що відповідає номінальній напрузі при холостому ході;

$i_{fk.n}$ – струм збудження синхронного генератора, що відповідає номінальному струму якоря $I_{ан}$ при короткому замиканні.

Інший вираз для визначення ВКЗ:

$$BKZ = \frac{U_n}{I_n \cdot X_d} = \frac{1}{X_d^*}, \quad (3.20)$$

де X_d^* – відносне значення синхронного індуктивного опору по повздовжній осі:

$$X_d^* = \frac{1}{X_d}. \quad (3.21)$$

Синхронний індуктивний опір по повздовжній осі можна визначити і через повний фазний опір обмотки якоря $Z_{нф}$:

$$X_d = X_d^* \cdot Z_{нф}. \quad (3.22)$$

Зміна напруги синхронного генератора:

$$\Delta U_{\%} = \frac{E_0 - U_n}{U_n} \cdot 100\%, \quad (3.33)$$

де E_0 – ЕРС холостого ходу.

Електромагнітна потужність, що розвивається синхронною машиною:

$$P_{ем} = m \cdot E_{ген} \cdot I_a \cdot \cos\psi, \quad (3.34)$$

де m – кількість фаз обмотки якоря ($m = 3$ для трифазних машин).

Спожита генератором потужність:

$$P_1 = M \cdot \omega_1, \quad (3.35)$$

де ω_1 – кутова швидкість обертання ротора, рад/с, ($\omega_1 = 2\pi f/p$);

M – момент на валу генератора.

Корисна активна потужність, яка віддається синхронним генератором в мережу:

$$P_2 = m U_{мер} \cdot I_a \cdot \cos\varphi, \quad (3.36)$$

де $U_{мер}$ – напруга мережі.

Електромагнітна потужність явнополюсного генератора, виражена через кут навантаження Θ (кутова характеристика)

$$P_{ем} = \frac{m \cdot U \cdot E}{X_d} \sin\theta + \frac{mU^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin(2\theta). \quad (3.37)$$

Електромагнітний момент явнополюсного генератора:

$$M_{ем} = \frac{m \cdot U \cdot E}{\omega_1 \cdot X_d} \sin(\theta) + \frac{mU^2}{2 \cdot \omega_1} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin(2\theta). \quad (3.38)$$

Електромагнітна потужність та момент неявнополюсного генератора:

$$P_{em} = \frac{m \cdot U \cdot E}{X_c} \sin \theta, \quad (3.39)$$

$$M_{em} = \frac{m \cdot U \cdot E}{\omega_1 \cdot X_c} \sin \theta. \quad (3.40)$$

Статичне перевантаження синхронного генератора:

$$k_n = \frac{mU(E/X_d)}{mUI_{ном} \cos \varphi} = \frac{I_\kappa}{I_{ном} \cos \varphi} = BK3 \cdot \frac{1}{\cos \varphi}. \quad (3.41)$$

Синхронізувальна потужність P_c та синхронізувальний момент M_c синхронного генератора:

$$P_c = \frac{m \cdot U \cdot E}{X_d} \cdot \cos \theta + m \cdot U^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cdot \cos(2\theta), \quad (3.42)$$

$$M_c = \frac{m \cdot U \cdot E}{\omega_1 \cdot X_d} \cdot \cos \theta + \frac{m \cdot U^2}{\omega_1} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cdot \cos(2\theta). \quad (3.43)$$

Зарядна потужність синхронної машин:

$$S_3 = m \cdot \frac{U_{ном}^2}{X_d} = m \cdot U_{ном} \cdot I_3, \quad (3.44)$$

де I_3 – зарядний струм, який при роботі машини на чисто ємнісне навантаження створює такий магнітний потік реакції якоря, якого достатньо для встановлення номінальної напруги на виводах при відключеній обмотці збудження.

Енергетична діаграма потужностей синхронного двигуна наведена на рис. 3.1.

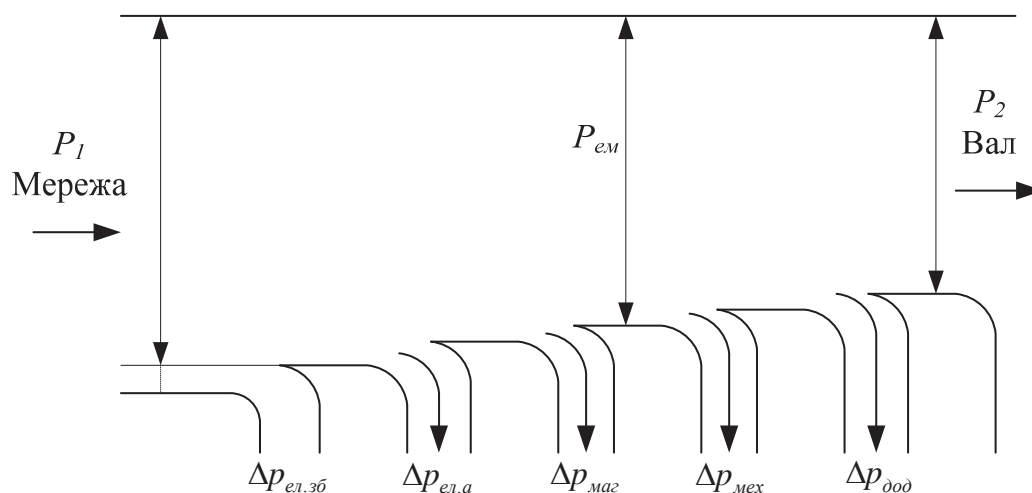


Рисунок 3.1 – Енергетична діаграма синхронного двигуна

Активна потужність P_1 , яка споживається з мережі синхронним двигуном:

$$P_1 = m \cdot U \cdot I_a \cdot \cos\varphi. \quad (3.45)$$

Корисна потужність на валу синхронного двигуна:

$$P_2 = M_2 \cdot \omega. \quad (3.46)$$

Електромагнітна потужність синхронного двигуна:

$$P_{ем} = m \cdot E \cdot I_a \cdot \cos\psi. \quad (3.47)$$

Електричні втрати в обмотці якоря:

$$\Delta p_{ел.а} = m \cdot I_a^2 \cdot R_a. \quad (3.48)$$

ККД:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}. \quad (3.49)$$

Значення коефіцієнта навантаження при максимумі ККД:

$$\beta_{\max} = \sqrt{\frac{\Delta p_{\text{пост}}}{\Delta p_{\text{зм}}}}, \quad (3.50)$$

де $\Delta p_{\text{пост}}$ – постійні втрати:

$$\Delta p_{\text{пост}} = \Delta p_{\text{мг}} + \Delta p_{\text{мх}}; \quad (3.51)$$

$\Delta p_{\text{зм}}$ – змінні втрати:

$$\Delta p_{\text{зм}} = \Delta p_{\text{ел.а}} + \Delta p_{\text{ел.зб}} + \Delta p_{\text{д}}. \quad (3.52)$$

Сумарні втрати:

$$\Delta p_{\Sigma} = \Delta p_{\text{пост}} + \Delta p_{\text{зм}}. \quad (3.53)$$

Максимальний ККД:

$$\eta_{\max} = 1 - \frac{\Delta p_{\text{пост}} + \beta_{\max} \cdot \Delta p_{\text{зм}}}{\beta_{\max} \cdot P_{\text{н}} + \Delta p_{\text{пост}} + \beta_{\max} \cdot \Delta p_{\text{зм}}}. \quad (3.54)$$

Потужність при максимальному ККД:

$$P'_2 = \beta_{\max} \cdot P_{2\text{н}}. \quad (3.55)$$

4 МАШИНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Рекомендована література [3, 6, 9 – 11].

4.1 Задачі

1. Генератор незалежного збудження має потужність на виході $P_n = 2400$ кВт і напругу $U_n = 600$ В, опір якірного кола при робочій температурі $R_a = 0,006$ Ом і спад напруги на щітковому контакті $\Delta U_{щ} = 2$ В. Визначити ЕРС генератора.

2. Генератор паралельного збудження при напрузі $U_n = 230$ В віддає в мережу потужність $P_n = 4,6$ кВт. При цьому спад напруги в колі якоря $\Delta U_a = 40$ В, а опір кола збудження $R_z = 230$ Ом. Нехтуючи поперечною реакцією якоря, визначити електромагнітну потужність генератора.

3. Генератор незалежного збудження, що має опір якоря при робочій температурі $R_a = 0,04$ Ом, навантажений зовнішнім опором $R_{нав} = 0,5$ Ом. Визначити ЕРС на затискачах генератора в номінальному режимі навантаження при напрузі генератора $U_n = 230$ В, електромагнітну та корисну потужності генератора.

4. Для номінального режиму роботи генератора незалежного збудження визначити струм навантаження, ЕРС обмотки якоря і втрати потужності в колі якоря, якщо номінальна потужність генератора $P_n = 1200$ кВт, $U_n = 750$ В, опори при 75° С обмоток: якоря $R_a = 0,006$ Ом, додаткових полюсів $R_{дп} = 0,001$ Ом, компенсаційної $R_{ко} = 0,03$ Ом.

5. Генератор паралельного збудження при $U_n = 230$ В віддає у навантаження струм $I_n = 200$ А. Визначити електромагнітну та корисну потужність генератора, якщо при робочій температурі опори кола якоря $R_a = 0,1$ Ом; збудження $R_z = 46$ Ом.

6. В пази якоря чотириполюсного генератора паралельного збудження вкладається проста петльова обмотка з числом активних провідників $N = 500$, якір обертається з $\omega = 256,4$ рад/с, при цьому в його обмотці наводиться ЕРС $E_a = 490$ В, протікає струм $I_a = 60$ А при опорах кола якоря $R_a = 0,5$ Ом. Визначити напругу на затискачах генератора, магнітний потік в зазорі та електромагнітний гальмівний момент генератора.

7. Генератор незалежного збудження при номінальному навантаженні має $U_n = 230$ В, струм навантаження $I_n = 6,52$ А, ККД $\eta = 0,8$. Визначити

напругу на затискачах генератора, магнітний потік в зазорі та електромагнітний момент.

8. Чотириполюсний генератор паралельного збудження містить на якорі просту хвильову обмотку з числом активних провідників $N = 314$, опір кола якоря $R_a = 5$ Ом. При номінальній швидкості обертання $\omega = 264$ рад/с генератор віддає в навантаження потужність $P_n = 1,5$ кВт при струмі якоря $I_{an} = 6,82$ А, струмі збудження $I_z = 0,3$ А. Визначити величини ЕРС обмотки якоря, магнітного потоку в зазорі та електромагнітну потужність генератора, нехтуючи реакцією якоря та спадом напруги в щіткових контактах.

9. На міських комунаціях одночасно рухаються 40 трамваїв та 60 тролейбусів. Для живлення контактної мережі з $U_n = 550$ В використовується електростанція з десятьма однакової потужності генераторами постійного струму незалежного збудження, що працюють паралельно і мають однакове навантаження. Нехтуючи втратами потужності в контактній мережі необхідно визначити корисну потужність і струм якоря кожного генератора, якщо в середньому один трамвай споживає струм $I_{тпм} = 100$ А, а тролейбус – $I_{тпб} = 120$ А.

10. Генератор постійного струму змішаного збудження в номінальному режимі має $P_n = 100$ кВт, $U_n = 460$ В, опір обмотки якоря $R_a = 0,08$ Ом, серієсної обмотки $R_{z,c} = 0,02$ Ом, шунтової $R_{z,ш} = 92$ Ом. Визначити для номінального режиму роботи струми якоря та збудження, ЕРС обмотки якоря та електромагнітну потужність.

11. Чотириполюсний шунтовий генератор в номінальному режимі навантаження має $P_n = 23$ кВт, $U_n = 230$ В, $n_n = 1460$ об/хв, опір кола якоря $R_a = 0,2$ Ом, збудження $R_z = 115$ Ом. Обмотка якоря проста, петльова з числом активних провідників $N = 314$. Визначте ЕРС генератора, ККД генератора і момент на валу приводного двигуна.

12. Генератор постійного струму в номінальному режимі навантаження має $P_n = 68$ кВт, $n_n = 1470$ об/хв при $P_{1n} = 80$ кВт. Визначити сумарні втрати потужності, ККД генератора і момент на валу приводного двигуна.

13. Генератор незалежного збудження в номінальному режимі при $U_n = 115$ В має опір кола якоря $R_a = 0,115$ Ом. Визначити ЕРС генератора, корисну та електромагнітну потужності, якщо номінальний спад напруги $\Delta U_n = 10\%$. Реакцію якоря не враховувати.

14. Генератор паралельного збудження при $P_n = 190$ кВт та $U_n = 460$ В має $R_a = 0,05$ Ом, $R_z = 92$ Ом. Генератор має компенсаційну обмотку. Відомі втрати: $\Delta p_{мех} = 1,2$ кВт, $\Delta p_{маг} = 1,5$ кВт. Визначити величини струмів

якоря та збудження, постійних, змінних та сумарних втрат, номінальний ККД, а також потужність $P_{2\max}$, при якій ККД досягає максимуму.

15. Двигун незалежного збудження при живленні від мережі $U_n = 220$ В споживає $P_{1n} = 22$ кВт. При цьому $\Delta U_a = 5\%$. Визначити ЕРС обмотки якоря, втрати потужності в колі якоря та електромагнітну потужність двигуна.

16. Для привода металорізального верстата використовується шунтовий двигун постійного струму з номінальними величинами: $P_{1n} = 4,5$ кВт, $U_n = 220$ В, $\eta_y = 80\%$. Накресліть електричну схему двигуна, визначте номінальний струм якоря, якщо номінальний струм збудження становить 5% від споживаного з мережі струму.

17. Для привода водяного насоса використовується двигун паралельного збудження з номінальними величинами: $P_{1n} = 40$ кВт, $U_n = 110$ В, $\eta_n = 0,8$. При температурі 20° С опори кола якоря $R_a = 0,01$ Ом; збудження $R_z = 11$ Ом. Визначити кратність пускового струму якоря при прямому пуску.

18. Серієсний двигун має на щитку такі дані: $U_n = 220$ В, швидкість обертання $n_n = 1000$ об/хв, $M_{2n} = 410$ Нм, $\eta_n = 80\%$. Визначити корисну потужність, споживану з мережі потужність, а також сумарні втрати в двигуні.

19. Двигун паралельного збудження з $P_n = 14$ кВт при $U_n = 220$ В та $\eta_n = 0,8$ має $R_a = 0,15$ Ом, $R_z = 110$ Ом. Розрахувати величину опору пускового реостата, який обмежить величину пускового струму до $I_{an} = 1,6I_{an}$. Вважати, що при робочій температурі R_n буде в 1,215 раза більший, ніж в холодостому ході.

20. Трамвайний серієсний двигун при номінальному навантаженні має $P_n = 100$ кВт, $U_n = 550$ В, $n_n = 1200$ об/хв, $\eta_n = 0,91$. При робочій температурі опори $R_a = 0,07$ Ом, $R_z = 0,03$ Ом. Визначити P_{1n} , сумарні втрати Δp_Σ , втрати в якорі $\Delta p_{ел.а}$, втрати на збудження $\Delta p_{зб}$, ЕРС обмотки якоря E_a . Визначте також, скільки процентів від U_n становлять ЕРС та спад напруги в колі якоря.

21. Двигун незалежного збудження має номінальні дані: $P_n = 10$ кВт, $U_n = 220$ В, $\eta_n = 80\%$, $R_{a(75^\circ)} = 0,25$ Ом. Якір двигуна обертається з номінальною швидкістю n_n . Розрахувати опір, який потрібно ввести в коло якоря, щоб при незмінному навантаженні його швидкість зменшилась до $n_n/3$.

22. Серієсний двигун при номінальному навантаженні має $U_n = 220$ В, $n_n = 1440$ об/хв. При ККД $\eta_n = 82\%$ споживає потужність $P_{1n} = 11$ кВт. Визначити M_{2n} , а також величину R_n при пуску двигуна з кратністю пускового струму $K_{nl} = I_n/I_n = 2$, якщо в режимі холодостого ходу $R_\partial = 0,4$ Ом.

23. Шунтовий двигун в номінальному режимі при $U_n = 110$ В споживає струм $I_n = 36$ А, швидкість $n_n = 1450$ об/хв, $R_{a(75^\circ)} = 0,15$ Ом, $R_z = 55$ Ом. Визначити, на скільки процентів збільшиться швидкість при зменшенні магнітного потоку на 30%. Вважати, що U_n та I_{an} залишаться незмінними.

24. Серієсний двигун при номінальному навантаженні має $P_n = 110$ кВт, $U_n = 550$ В, $\eta_n = 91\%$, $R_a = 0,15$ Ом, $\omega_n = 157$ рад/с. Визначити I_{an} , P_{1n} , E_{an} , P_{em} , електромагнітний та корисний моменти.

25. Шунтовий двигун, що має $P_n = 55$ кВт при живленні від мережі $U_n = 440$ В обертається зі швидкістю $n_n = 1460$ об/хв і має $\eta_n = 0,8$. Визначити електромагнітний момент і корисний момент двигуна, якщо спад напруги $\Delta U_a = 5\%$ від U_n , а струм збудження $I_z = 6,25$ А.

26. Шунтовий двигун при живленні від мережі $U_n = 220$ В споживає струм $I_n = 80$ А, обертається зі швидкістю $n_n = 1000$ об/хв. Опори $R_a = 0,01$ Ом, $R_z = 110$ Ом. Нехтуючи реакцією якоря та струмом якоря на холостому ході, визначити швидкість на холостому ході n_0 та процентну швидкість при переході двигуна від номінальної швидкості в режим холостого ходу.

27. Серієсний двигун при номінальному навантаженні має $P_{1n} = 8$ кВт, $U_n = 110$ В, $R_a = 0,09$ Ом та $R_{z.c} = 0,05$ Ом. Двигун не має компенсаційної обмотки. Визначити η_n , η_{max} та потужність при η_{max} , якщо $\Delta p_{mex} = 0,24$ кВт, $\Delta p_n = 0,12$ кВт.

28. Шунтовий двигун живиться від окремого генератора, при $U_n = 440$ В розвиває потужність $P_n = 190$ кВт при $\eta_n = 0,91$ і швидкості $n_n = 1430$ об/хв. Опори $R_{a(75^\circ)} = 0,03$ Ом, $R_z = 50$ Ом. Для зменшення швидкості генератора на 25% визначити нове значення швидкості за умови, що навантаження та магнітний потік не змінилися.

29. В серієсному двигуні при $U_n = 220$ В та $R_a = 0,01$ Ом спад напруги становить 4% від U_n . Визначити споживані двигуном струм і потужність, ЕРС та електромагнітну потужність.

30. Два серієсних двигуни однакової потужності встановлені на електровозі, увімкнені паралельно в мережу, що має $U_n = 550$ В і споживають кожен струм $I_n = 500$ А, опір $R_{a(75^\circ)} = 0,05$ Ом. Обертаючись з номінальною швидкістю $n_n = 600$ об/хв двигуни рухають електровоз із швидкістю $\vartheta = 60$ км/год. Якою буде швидкість руху електровоза, якщо двигуни переключити з паралельного з'єднання на послідовне при незмінних навантаженнях на валу й магнітних потоках двигунів.

4.2 Основні формули

Миттєве значення ЕРС для одного провідника обмотки:

$$e_{np} = B_{\delta} l \vartheta, \quad (4.1)$$

де B_{δ} – індукція в повітряному зазорі від основного магнітного поля в точці, де знаходиться провідник;

l – активна довжина провідника, що перетинає силові лінії поля;

ϑ – лінійна швидкість руху провідника:

$$\vartheta = \frac{\pi D_a n}{60}, \quad (4.2)$$

де D_a – діаметр якоря, м;

n – частота обертання якоря, об/хв.

Кутова швидкість обертання ротора:

$$\omega = \frac{2\pi n}{60}. \quad (4.3)$$

ЕРС, яка індукується в обмотці якоря:

$$E_a = c_e n \Phi, \quad (4.4)$$

$$E_a = c_m \omega \Phi, \quad (4.5)$$

де Φ – магнітний потік;

c_e, c_m – конструктивні сталі машини:

$$c_e = \frac{pN}{60a}, \quad (4.6)$$

$$c_m = \frac{pN}{2\pi a}, \quad (4.7)$$

де p – число пар полюсів;

N – число активних провідників обмотки якоря;

a – кількість паралельних віток обмотки якоря.

Баланс ЕРС генератора:

$$U_a = E_a - I_a R_{a\Sigma}, \quad (4.8)$$

де U_a – напруга обмотки якоря;

I_a – струм, що протікає по обмотці якоря;

$R_{a\Sigma}$ – сумарний опір якірного кола, який складається з власного опору обмотки якоря R_a , опору додаткових полюсів $R_{\partial.n.}$, опору компенсаційної обмотки $R_{к.о.}$ та опору щітково-колекторного переходу $R_{щ.}$:

$$R_{a\Sigma} = R_a + R_{\partial.n.} + R_{к.о.} + R_{щ.} \quad (4.9)$$

Баланс потужності генератора:

$$U_a I_a = E_a I_a - I_a^2 R_{a\Sigma}. \quad (4.10)$$

Баланс ЕРС двигуна:

$$U_a = E_a + I_a R_{a\Sigma}. \quad (4.11)$$

Баланс потужності двигуна:

$$U_a I_a = E_a I_a + I_a^2 R_{a\Sigma}. \quad (4.12)$$

Електрична потужність на затискачах якоря:

$$P_a = U_a I_a. \quad (4.13)$$

Електромагнітна потужність:

$$P_{ем} = E_a I_a. \quad (4.14)$$

Електричні втрати потужності в якорі:

$$\Delta p_{ел.а} = I_a^2 R_{a\Sigma}. \quad (4.15)$$

Електромагнітний момент:

$$M = c_m \Phi I_a. \quad (4.16)$$

Схеми для машин постійного струму подані на рис. 4.1 – рис. 4.4.

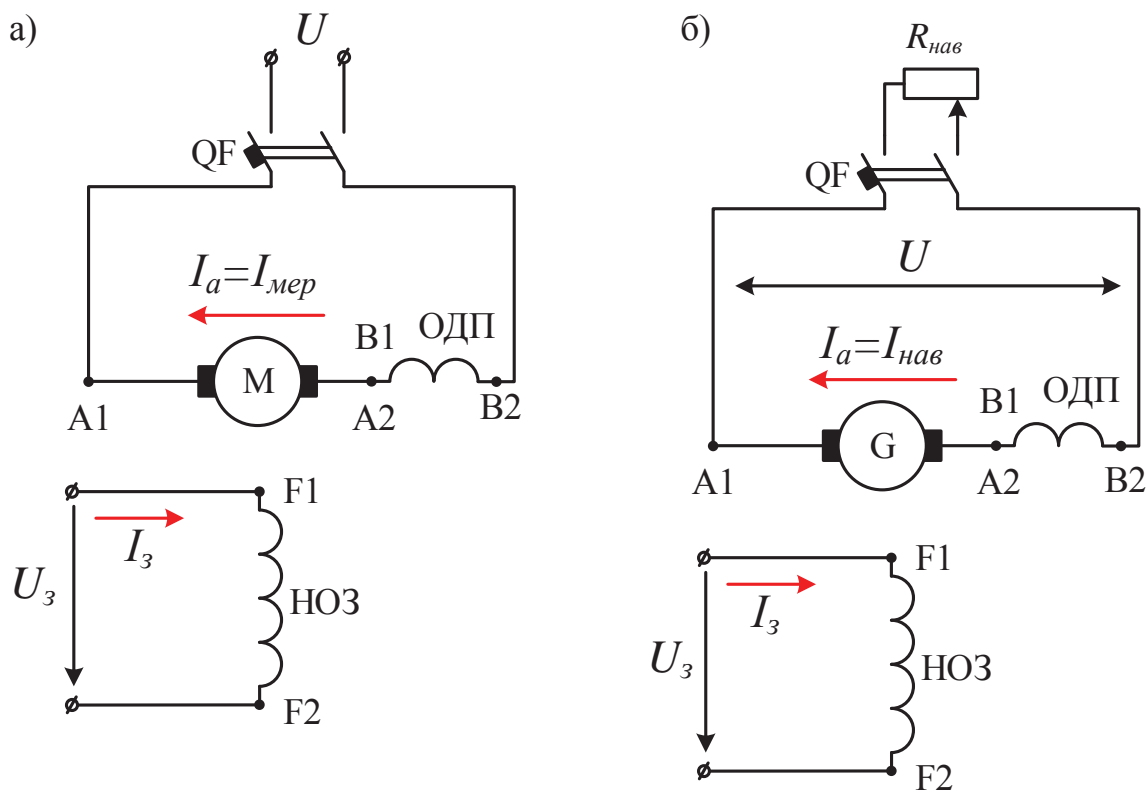


Рисунок 4.1 – Схеми для машин незалежного збудження:

а) двигуна; б) генератора

Для машин постійного струму баланс струмів (відповідно до першого закону Кірхгофа) залежить від режиму їхньої роботи. Для зручності їх зведено да табл. 4.1.

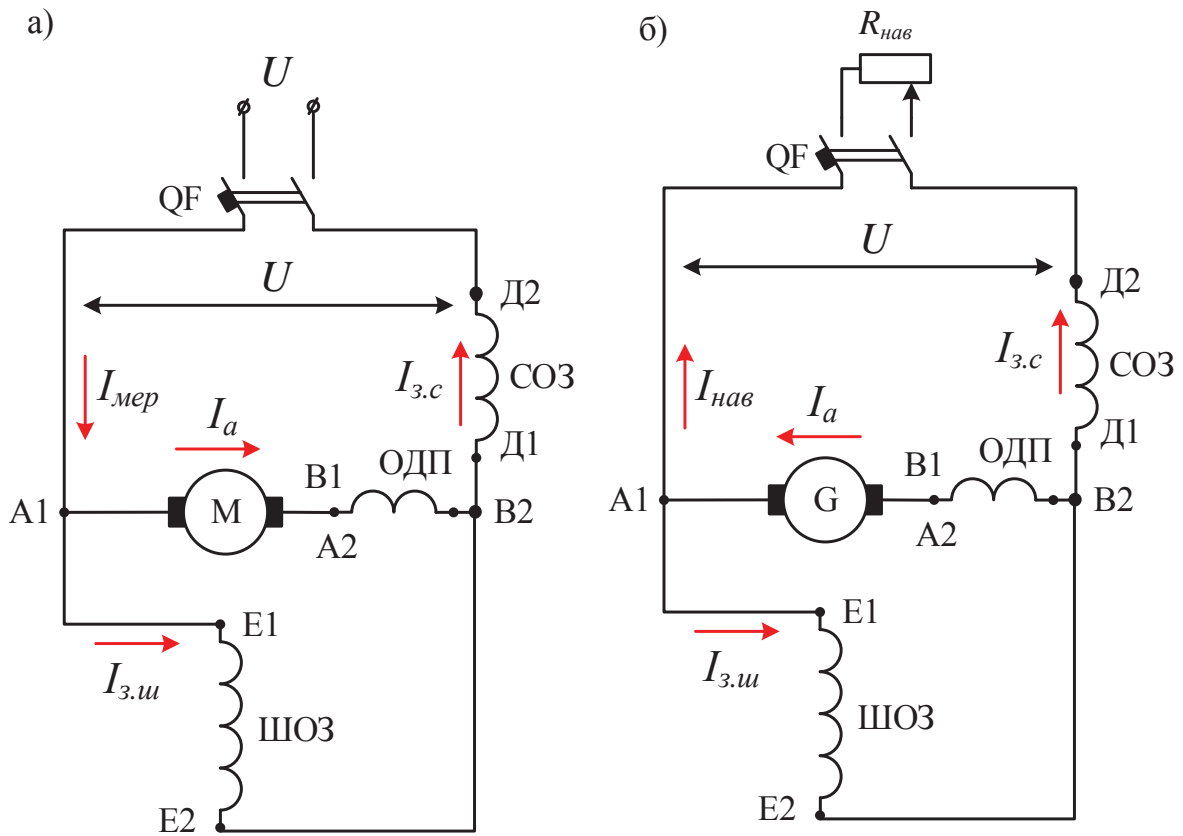


Рисунок 4.2 – Схеми для машин паралельного збудження (шунтових):
а) двигуна; б) генератора

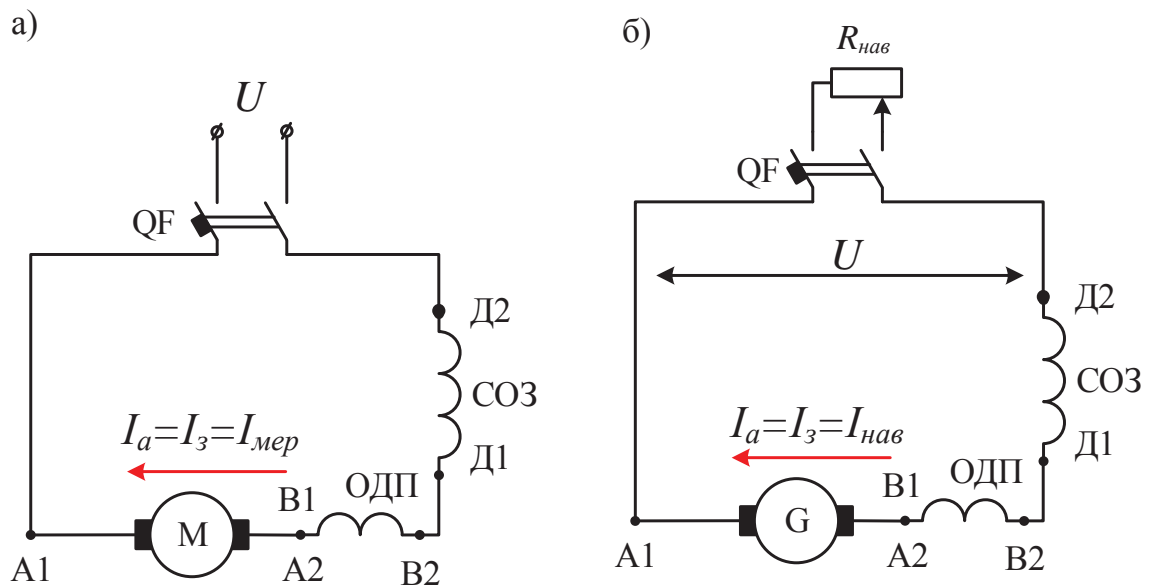


Рисунок 4.3 – Схеми для машин послідовного збудження (серієсних):
а) двигуна; б) генератора

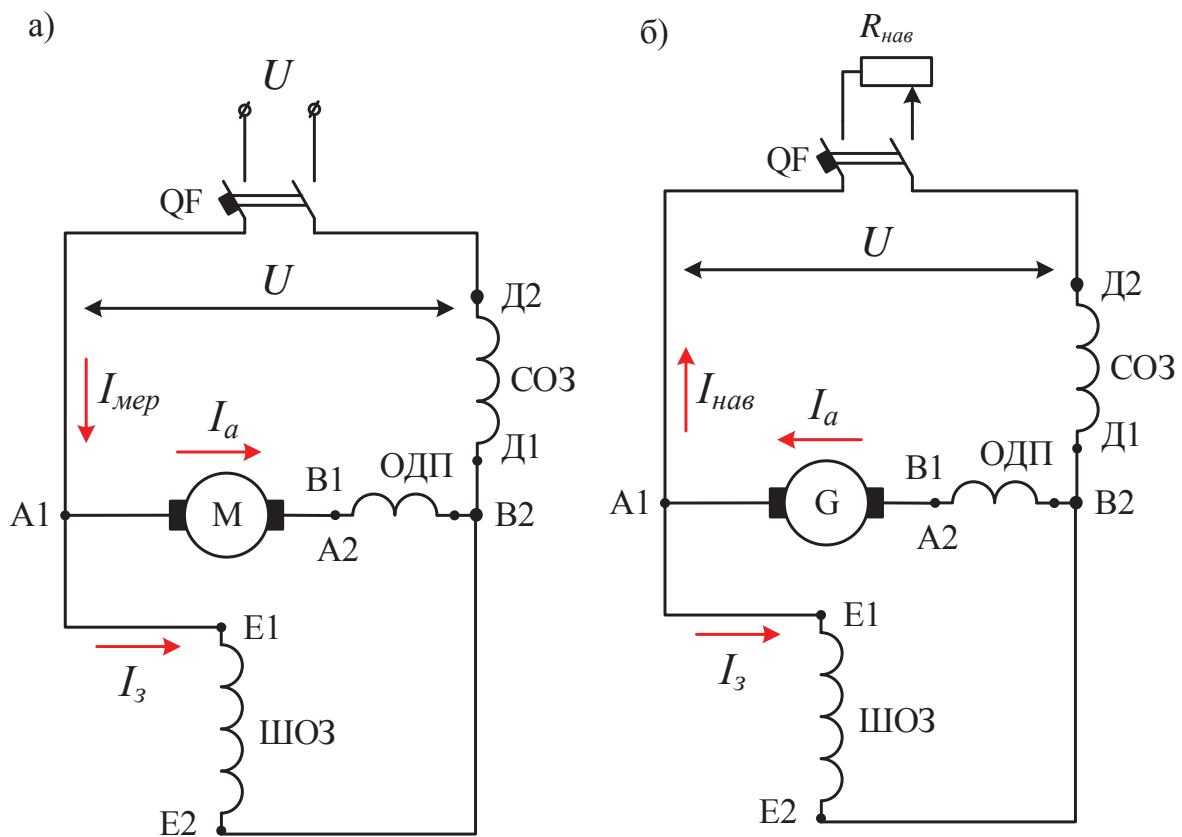


Рисунок 4.4 – Схеми для машин змішаного збудження (компаундних):
а) двигуна; б) генератора

Таблиця 4.1 – Баланс струмів машин постійного струму

Тип збудження	Режим двигуна	Режим генератора
Незалежне	$I_a = I_{мер}$	$I_a = I_{нав}$
Паралельне	$I_a = I_{мер} - I_з$	$I_a = I_{нав} + I_з$
Послідовне	$I_a = I_{мер} = I_з$	$I_a = I_{нав} = I_з$
Змішане	$I_a = I_{мер} - I_{з,ш}$ $I_{з,c} = I_{мер}$	$I_a = I_{нав} + I_{з,ш}$ $I_{з,c} = I_{нав}$

В табл. 4.1 прийнято такі позначення: $I_{мер}$ – струм мережі; $I_{мер}$ – струм навантаження; $I_з$ – струм обмотки збудження; $I_{з,ш}$ – струм шунтової обмотки збудження; $I_{з,c}$ – струм серієсної обмотки збудження.

Енергетична діаграма для генератора незалежного збудження показана на рис. 4.5, а для генераторів паралельного, послідовного та змішаного збудження – на рис. 4.6.

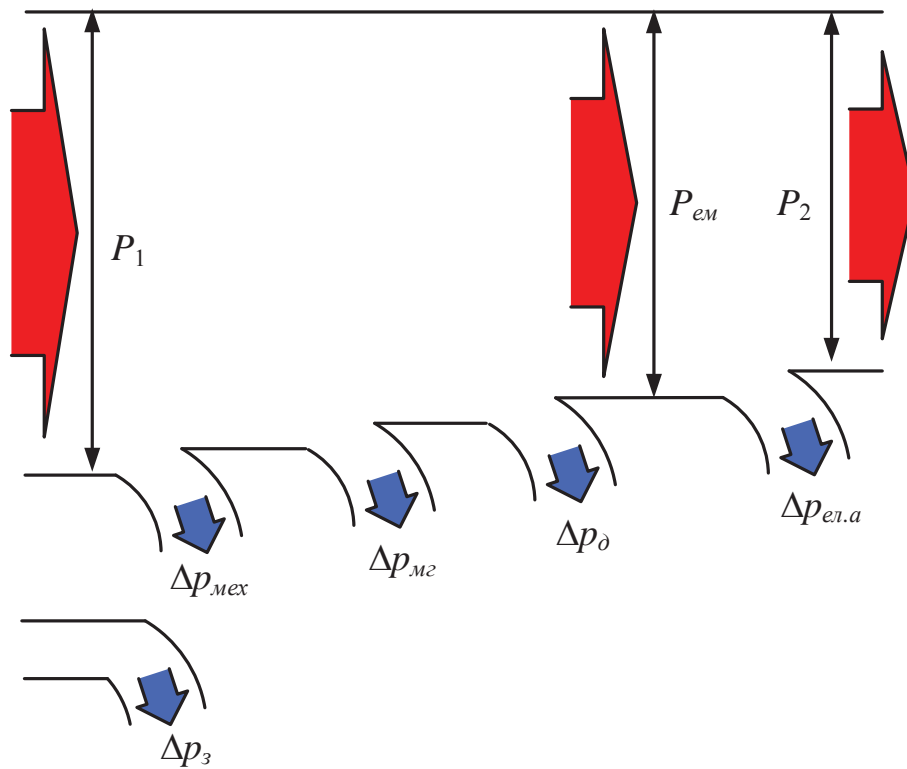


Рисунок 4.5 – Енергетична діаграма для генератора незалежного збудження

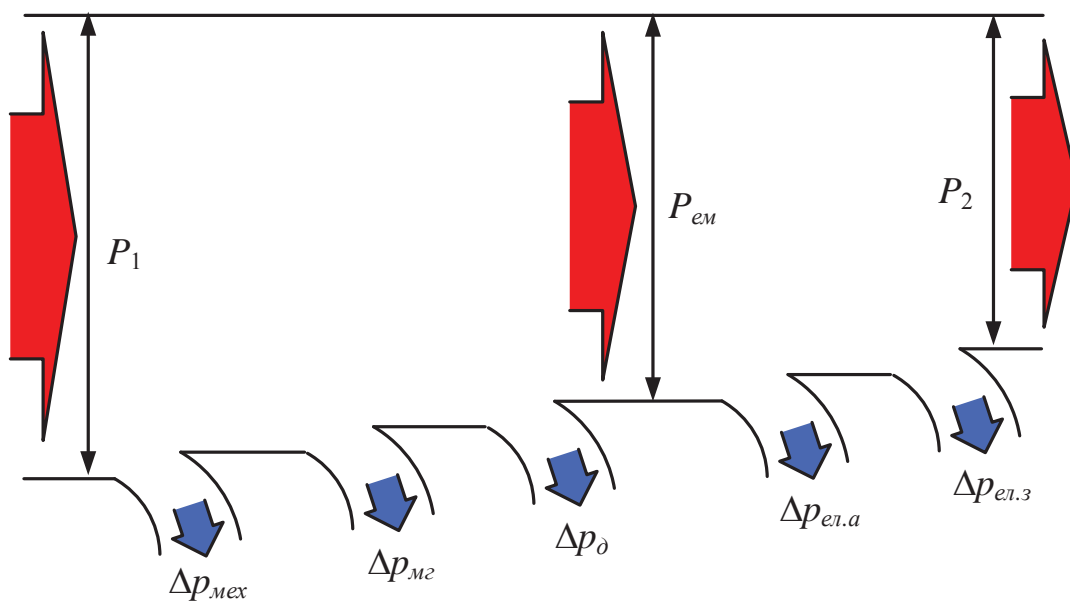


Рисунок 4.6 – Енергетична діаграма для генераторів паралельного, послідовного та змішаного збудження

Механічні втрати:

$$P_{мх} = P_{підш} + P_{вент} + P_{тр.щ}, \quad (4.17)$$

де $P_{підш}$ – втрати у підшипниках;

$P_{вент}$ – втрати на вентиляцію;

$P_{тр.щ}$ – втрати на тертя щіток.

Магнітні втрати:

$$P_{мг} = P_{мга} + P_{мгз} + P_{пов} + P_{пульс}, \quad (4.18)$$

де $P_{мга}$ – втрати в сердечнику якоря;

$P_{мгз}$ – втрати в зубцях якоря;

$P_{пов}$ – поверхневі втрати в полюсних наконечниках;

$P_{пульс}$ – пульсаційні втрати в зубцях.

Електричні втрати в колі збудження:

$$\Delta p_{ел.з} = I_3^2 R_3, \quad (4.19)$$

де R_3 – опір обмотки збудження.

Втрати в перехідних опорах щіткових контактів для щіток однієї полярності:

$$\Delta p_{ел.щ} = \Delta U_{щ} I_a, \quad (4.20)$$

де $\Delta U_{щ}$ – спад напруги на один щітковий контакт.

Приймається для вугільних і графітних щіток $\Delta U_{щ} = 1$ В і для метало-вугільних щіток $\Delta U_{щ} = 0,3$ В.

Електричні втрати (сумарні) для машин паралельного, послідовного та змішаного збудження:

$$\Delta p_{ел} = \Delta p_{ел.а} + \Delta p_{ел.з} + \Delta p_{ел.щ}. \quad (4.21)$$

Електричні втрати (сумарні) для машин незалежного збудження:

$$\Delta p_{ел} = \Delta p_{ел.а} + \Delta p_{ел.щ}. \quad (4.22)$$

Сумарні втрати:

$$\Delta p_{\Sigma} = P_1 - P_2 \quad (4.23)$$

або

$$\Delta p_{\Sigma} = \Delta p_{мх} + \Delta p_{мг} + \Delta p_{ел} + \Delta p_{\delta}, \quad (4.24)$$

де Δp_{δ} – додаткові втрати.

ККД:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = 1 - \frac{\Delta p_{\Sigma}}{P_2 + \Delta p_{\Sigma}} = \frac{P_2}{P_2 + \Delta p_{\Sigma}}. \quad (4.25)$$

Коефіцієнт навантаження:

$$k_{нав} = \frac{I}{I_H} = \frac{P_2}{P_{2H}}. \quad (4.26)$$

Значення коефіцієнта навантаження при максимумі ККД:

$$\beta_{\max} = \sqrt{\frac{\Delta p_{пост}}{\Delta p_{зм}}}, \quad (4.27)$$

де $\Delta p_{пост}$ – постійні втрати:

$$\Delta p_{пост} = \Delta p_{мг} + \Delta p_{мх}; \quad (4.28)$$

$\Delta p_{зм}$ – змінні втрати:

$$\Delta p_{зм} = \Delta p_{ел} + \Delta p_{\delta}. \quad (4.29)$$

Максимальний ККД:

$$\eta_{\max} = 1 - \frac{2\Delta p_{\text{пост}}}{\beta_{\max} \cdot P_{2H} + 2\Delta p_{\text{пост}}}. \quad (4.30)$$

Номінальний спад напруги в генераторі:

$$\Delta U_H = \frac{U_0 - U_H}{U_H} \cdot 100, \quad (4.31)$$

де U_0 – напруга холостого ходу.

Момент на валу двигуна:

$$M_2 = \frac{P_2}{\omega}. \quad (4.32)$$

Швидкісна характеристика двигуна:

$$n = \frac{U_a - R_a \Sigma I_a}{c_e \Phi}. \quad (4.33)$$

Механічна характеристика двигуна:

$$n = \frac{U_a}{c_e \Phi} - \frac{R_a \Sigma M}{c_e c_M \Phi^2}. \quad (4.34)$$

Швидкість ідеального холостого ходу двигуна:

$$n_0 = \frac{U_a}{c_e \Phi}. \quad (4.35)$$

Зменшення швидкості двигуна:

$$\Delta n = \frac{R_a \Sigma M}{c_e c_M \Phi^2} = \frac{R_a \Sigma I_a}{c_e \Phi}. \quad (4.36)$$

Пусковий струм при:

– прямому пуску

$$I_n = \frac{U_n}{R_{a\Sigma}}; \quad (4.37)$$

– реостатному пуску

$$I_n = \frac{U_n}{R_{a\Sigma} + R_n}, \quad (4.38)$$

де R_n – пусковий опір (включається послідовно з обмоткою якоря).

Струм якоря двигуна в режимі динамічного гальмування:

$$I_a = \frac{E_a}{R_{a\Sigma} + R_{\text{доб}}}, \quad (4.39)$$

де $R_{\text{доб}}$ – додатковий опір, підключений до обмотки якоря (паралельно).

Струм якоря двигуна в режимі електромагнітного гальмування:

$$I_a = \frac{E_a + U_a}{R_{a\Sigma} + R'_{\text{доб}}}, \quad (4.40)$$

де $R'_{\text{доб}}$ – додатковий опір, підключений послідовно з обмоткою якоря.

Література

1. Грабко В. В. Експериментальні дослідження електричних машин. Частина IV. Трансформатори : навчальний посібник / Грабко В. В., Розводюк М. П., Левицький С. М. – Вінниця : ВНТУ, 2008. – 219 с.
2. Електричні машини. трансформатори. Дистанційний курс – [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://elearn.vntu.edu.ua/course_structure.php?CID=256. – Назва з екрана.
3. Вольдек А. И. Электрические машины / Вольдек А. И. – М. : Энергия, 1978. – 832 с.
4. Грабко В. В. Електричні машини. Розрахунок експлуатаційних характеристик. Курсове проектування : навчальний посібник / В. В. Грабко, М. П. Розводюк. – Вінниця : ВНТУ, 2010. – 110 с.
5. Грабко В. В. Електричні машини. Розрахунок експлуатаційних характеристик. Курсове проектування [Електронний ресурс] : електронний навчальний посібник / В. В. Грабко, М. П. Розводюк. – Вінниця, ВНТУ, 2011. – Режим доступу : <http://posibnyky.vntu.edu.ua>.
6. Токарев Б. Ф. Электрические машины : учеб. пособие для вузов / Токарев Б. Ф. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 624 с.
7. Брускин Д. Э. Электрические машины. Ч. 1 : [учебник для электротехнических специальностей вузов] / Брускин Д. Э., Зорохович А. Е., Хвостов В.С. – [2-е изд., перераб. и доп.]. – М. : Высш. шк., 1987. – 319 с.
8. Експериментальні дослідження електричних машин. Частина III. Асинхронні машини : [навчальний посібник] / В. В. Грабко, М. П. Розводюк, С. М. Левицький, М. О. Казак. – Вінниця : ВНТУ, 2007. – 197 с.
9. Брускин Д. Э. Электрические машины. Ч. 2 : [учебник для электротехнических специальностей вузов] / Брускин Д. Э., Зорохович А. Е., Хвостов В.С. – [2-е изд., перераб. и доп.]. – М. : Высш. шк., 1987. – 335 с.
10. Грабко В. В. Експериментальні дослідження електричних машин. Частина I. Машини постійного струму : навчальний посібник / Грабко В. В., Розводюк М. П., Грабенко І. В. – Вінниця : ВНТУ, 2005. – 86 с.
11. Грабко В. В. Експериментальні дослідження електричних машин. Частина I. Машини постійного струму [Електронний ресурс] : електронний навчальний посібник / В. В. Грабко, М. П. Розводюк, І. В. Грабенко. – Вінниця, ВНТУ, 2012. – Режим доступу : <http://posibnyky.vntu.edu.ua>.

Навчальне видання

Михайло Петрович Розводюк

ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ
Задачі для самостійного розв'язування

Навчальний посібник

Редактор Т. Старічек

Оригінал-макет підготовлено М. П. Розводюком

Підписано до друку 05.02.2016 р.
Формат 29,7 × 42 ¼. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman.
Друк різнографічний. Ум. друк. арк. 4,3
Наклад 75 пр. Зам. № 2016-034.

Вінницький національний технічний університет.
навчально-методичний відділ ВНТУ.
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95.
ВНТУ, к. 2201.
Тел. (0432) 59-87-36.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано у Вінницькому національному технічному університеті
в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Тел. (0432) 59-87-38.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.