

Примеры расчёта

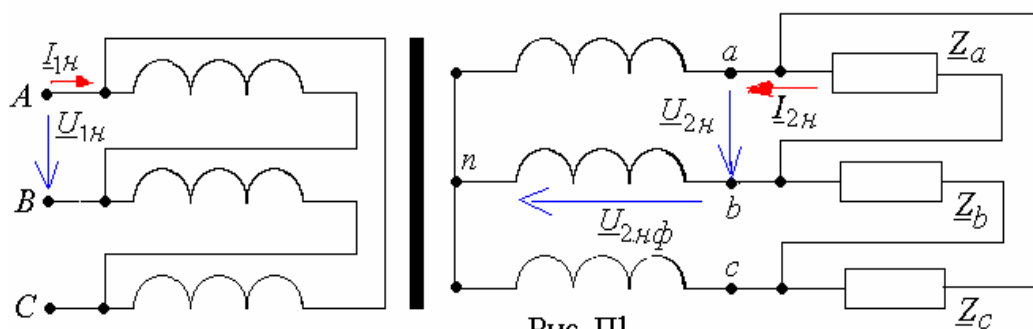
Пример 1. Трёхфазный понижающий трансформатор имеет номинальные паспортные данные:

$S_{1н} = 400 \text{ кВ}\cdot\text{А}$; $U_{1н} = 10 \text{ кВ}$; $U_{2н} = 0,4 \text{ кВ}$; $\Delta P_0 = 0,9 \text{ кВт}$; $\Delta P_{\kappa} = 5,5 \text{ кВт}$; $i_0(\%) = 2,1$; $u_{\kappa}(\%) = 5$; схемы соединения фазных обмоток трансформатора и нагрузки соответственно Δ/Y и Δ ; $\cos \varphi_{2н} = 0,8$; $\beta = 0,5$.

Определить:

- номинальные линейные и фазные напряжения и токи обмоток трансформатора;
- параметры электрической схемы замещения приведенного трансформатора и изобразить T-образную схему замещения фазы нагруженного трансформатора с указанием на ней всех параметров;
- КПД трансформатора при заданных коэффициентах β и $\cos \varphi_{2н}$.

Решение. 1. Электрическая схема замещения трансформатора с нагрузкой представлена на рис. П1.



2. Линейные и фазные напряжения и токи обмоток высшего напряжения (ВН), соединенных по схеме Δ :

- линейное и фазное напряжения

$$U_{1н} = U_{1фн} = 10 \text{ кВ} = 10000 \text{ В};$$

- линейный ток

$$I_{1н} = \frac{S_{1н}}{\sqrt{3} \cdot U_{1н}} = \frac{400}{1,73 \cdot 10} = 23,12 \text{ А};$$

- фазный ток

$$I_{1фн} = \frac{I_{1н}}{\sqrt{3}} = \frac{23,12}{1,73} = 13,36 \text{ А}.$$

3. Линейные и фазные напряжения и токи обмоток низшего напряжения (НН), соединенных по схеме Y :

- линейное напряжение

$$U_{2л} = U_{2н} = 0,4 \text{ кВ} = 400 \text{ В};$$

- фазное напряжение

$$U_{2\phi n} = \frac{U_{2н}}{\sqrt{3}} = \frac{0,4}{1,73} = 0,231 \text{ кВ} = 231 \text{ В};$$

- линейный и фазный токи

$$I_{2н} = I_{2\phi n} = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_{2н}} = \frac{400}{1,73 \cdot 0,4} = 578 \text{ А}.$$

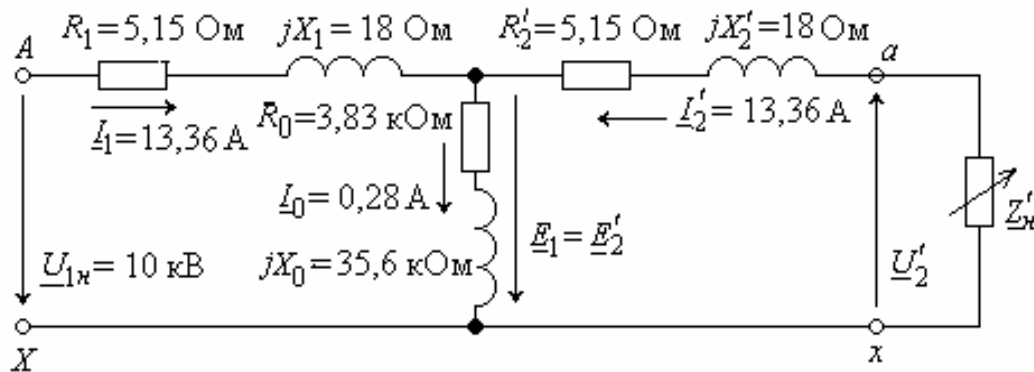


Рис. П2

4. Ток холостого хода

$$I_0 = I_{0\phi} = \frac{i_0(\%)}{100} \cdot I_{1\phi n} = \frac{2,1 \cdot 13,36}{100} = 0,28 \text{ А}.$$

5. Параметры схемы замещения фазы А трансформатора (рис. П2):

- полное сопротивление намагничивающей ветви:

$$Z_0 = \frac{U_{1\phi n}}{I_{0\phi}} = \frac{10000}{0,28} = 35714 \text{ Ом} \approx 35,7 \text{ кОм};$$

- активное сопротивление намагничивающей ветви, обусловленное потерями в стали ΔP_0 ,

$$R_0 = \frac{P_{0\phi}}{I_{0\phi}^2} = \frac{\Delta P_0}{3 \cdot I_{0\phi}^2} = \frac{900}{3 \cdot 0,28^2} = 3830 \text{ Ом} = 3,83 \text{ кОм};$$

- сопротивление взаимной индукции, обусловленное основным магнитным потоком,

$$X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2} = \sqrt{35714^2 - 3830^2} = 35600 \text{ Ом} = 35,6 \text{ кОм}.$$

6. Параметры обмоток трансформатора (согласно заданному значению напряжения и потерь мощности ΔP_k при коротком замыкании трансформатора):

- полное сопротивление обмоток трансформатора

$$Z_k = Z_1 + Z_2' = \frac{U_{k\phi}}{I_{1\phi n}} = \frac{500}{13,38} = 37,4 \text{ Ом},$$

где $U_{k\phi} = \frac{u_k(\%)}{100} U_{1\phi n} = \frac{5}{100} \cdot 10000 = 500 \text{ В};$

- полное активное сопротивление

$$R_k = R_1 + R'_2 = \frac{P_{\kappa\phi}}{I_{1\phi H}} = \frac{\Delta P_{\kappa H}}{3 \cdot I_{1\phi H}^2} = \frac{5500}{3 \cdot 13,38^2} = 10,3 \text{ Ом};$$

- полное реактивное сопротивление

$$X_k = X_1 + X'_2 = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} = \sqrt{37,4^2 - 10,3^2} = 36 \text{ Ом}.$$

При равенстве активных потерь, а так же чисел витков, их средних длин и потоков рассеяния сопротивления первичной и вторичной обмоток приведенного трансформатора примерно одинаковы, т. е.

$$R_1 \approx R'_2 = \frac{R_k}{2} = \frac{10,3}{2} = 5,15 \text{ Ом}; \quad X_1 \approx X'_2 = \frac{X_k}{2} = \frac{36}{2} = 18 \text{ Ом};$$

$$Z_1 = Z'_2 = \frac{Z_k}{2} = \frac{37,4}{2} = 18,7 \text{ Ом}.$$

7. Приведенный к первичной обмотке вторичный ток

$$I'_{2\phi H} = \frac{I_{2\phi H}}{n} = \frac{578}{43,29} = 13,36 \text{ А} \approx I_{1\phi H},$$

где $n = \frac{U_{1\phi K}}{U_{2\phi H}} = \frac{10000}{231} = 43,29$ - коэффициент трансформации.

8. КПД трансформатора при $\beta = 0,5$ и $\cos \varphi_2 = \cos \varphi_{2H} = 0,8$

$$\eta(\%) = \frac{\beta S_H \cos \varphi_{2H}}{\beta S_H \cos \varphi_{2H} + \Delta P_0 + \beta^2 \Delta P_K} 100 =$$

$$= \frac{0,5 \cdot 400 \cdot 0,8}{0,5 \cdot 400 \cdot 0,8 + 0,9 + 0,5^2 \cdot 5,5} = 98,6\%.$$

9. Угол магнитного запаздывания

$$\delta \approx \arcsin \frac{\Delta P_{0\phi}}{U_{1\phi H} I_{0\phi}} = \arcsin \frac{\Delta P_0}{3 \cdot U_{1\phi H} I_{0\phi}} = \arcsin \frac{900}{3 \cdot 10000 \cdot 0,28} = 6,15^\circ.$$

10. Коэффициент мощности при холостом ходе

$$\cos \varphi_0 \approx \cos(90^\circ - \delta^\circ) = \cos(90^\circ - 6,15^\circ) = 0,109.$$

11. Коэффициент мощности при нагрузке определить (приближенно) из векторной диаграммы.

12. Для расчёта внешней характеристики можно воспользоваться соотношением

$$U_2 = \frac{U_{1\phi H} - \Delta U}{n},$$

где $\Delta U \approx \beta(R_k I_{1\phi H} \cos \varphi_{2H} + X_k I_{1\phi H} \sin \varphi_{2H})$.

Пример 2. Трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором имеет номинальные данные:

- мощность по валу $P_{2н} = 10$ кВт;
- линейное напряжение $U_n = 380$ В при $f = 50$ Гц;
- частота вращения ротора $n_{2н} = 1450$ об/мин;
- число пар полюсов $p = 2$;
- КПД $\eta_n = 87,5\%$; коэффициент мощности $\cos \varphi_n = 0,88$;
- кратность пускового тока $\alpha = I_n / I_n = 5,0$;
- кратность пускового момента $\beta = M_n / M_n = 1,2$;
- кратность максимального момента $\lambda = M_{max} / M_n = 2,0$;
- схема соединения обмоток статора - Y.

Определить мощность и ток, потребляемые двигателем из сети при номинальной нагрузке, и пусковой ток АД.

Построить естественную механическую характеристику $n_2 = f(M)$ при изменении скольжения в пределах $0 \leq S \leq 1$.

Решение. 1. Мощность и ток, потребляемые АД из сети при номинальной нагрузке:

$$P_{1н} = \frac{P_{2н}}{\eta_n} = \frac{10}{0,875} = 11,48 \text{ кВт};$$

$$I_{1н} = \frac{P_{1н}}{\sqrt{3}U_n \cos \varphi_n} = \frac{11450}{1,73 \cdot 380 \cdot 0,88} = 15 \text{ А}.$$

2. Пусковой ток двигателя при номинальной нагрузке

$$I_{1п} = \alpha \cdot I_{1н} = 5 \cdot 15 = 75 \text{ А}.$$

3. Вращающие моменты:

– номинальный

$$M_n = 9550 \frac{P_{2н}}{n_{2н}} = 9550 \frac{10}{1450} = 65,86 \text{ Нм};$$

– пусковой

$$M_n = \beta M_n = 1,2 \cdot 65,86 = 79 \text{ Нм};$$

– максимальный

$$M_{max} = \lambda M_n = 2 \cdot 65,86 = 131,72 \text{ Нм}.$$

4. Полные потери в двигателе при номинальной нагрузке

$$\Delta P = P_{1н} - P_{2н} = 11,48 - 10 = 1,48 \text{ кВт}.$$

5. Вращающий момент асинхронного двигателя пропорционален квадрату фазного напряжения сети. При понижении напряжения на 10% пусковой момент равен

$$M'_n = 0,9^2 M_{max} = 0,81 \cdot 79 = 64 \text{ Нм} < M_n = 65,86 \text{ Нм}.$$

Поэтому пуск в ход двигателя при этих условиях невозможен.

6. Для построения механической характеристики $n_2 = f(M)$ определим:

– частоту вращения магнитного поля статора

$$n_1 = \frac{60 \cdot f_1}{p} = \frac{60 \cdot 50}{2} = 1500 \text{ об/мин};$$

– номинальное скольжение

$$S_n = \frac{n_1 - n_{2n}}{n_1} = \frac{1500 - 1450}{1500} = 0,0333.$$

Принимая значения скольжения $S = 0,25; 0,5; 0,75; 1$, вычислим соответствующие им частоты вращения ротора

$$n_2 = (1 - S)n_1 = (1 - S) \cdot 1500 \text{ об/мин}$$

и вращающие моменты по формуле Клосса

$$M = \frac{2M_{max}}{\frac{S}{S_{кр}} + \frac{S_{кр}}{S}} = \frac{2 \cdot 131,72}{\frac{S}{0,124} + \frac{0,124}{S}},$$

где $S_{кр} = S_n (\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}) = 0,0333 \cdot (2 + \sqrt{4 - 1}) = 0,124$ - критическое скольжение ротора, при котором вращающий момент $M = M_{max}$.

Результаты расчётов сведены в табл. П1.

7. По данным табл. П1 строим механическую характеристику двигателя $n = f(M)$ (рис. П3), выбрав соответствующие масштабы по осям (для $n_2 \rightarrow 1 \text{ см} : 200 \text{ об/мин}$; для $M \rightarrow 1 \text{ см} : 20 \text{ Нм}$).

В связи с тем, что значения моментов при скольжениях от $S_{кр}$ до $S = 1$ не вычисляются, механическая характеристика от M_n до M_{max} изображена пунктирной линией (см. рис. П3).

Таблица П1

Характеристики двигателя	Скольжение относительно S_n						
	$0,0S_n$	$0,25S_n$	$0,5S_n$	$0,75S_n$	$1,0S_n$	$S_{кр}$	Пуск
Скольжение	0	0,00825	0,0165	0,0248	0,0333	0,124	1
Частота вращения n_2 , об/мин	1500	1487	1475	1462	1450	1314	0

Вращающий момент, Н·м	0	17,63	34,8	51,2	65,86	131,72	79
-----------------------	---	-------	------	------	-------	--------	----

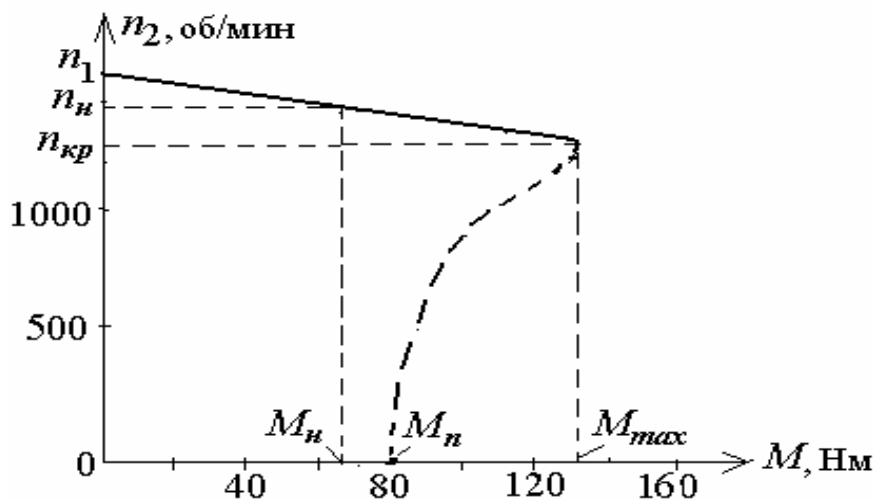


Рис. ПЗ

Пример 3. Номинальные данные генератора постоянного тока параллельного возбуждения: мощность $P_{2н} = 30$ кВт; напряжение $U_n = 230$ В; сопротивление обмотки якоря и дополнительных полюсов $R_{я} = 0,09$ Ом; сопротивление цепи возбуждения $R_{\epsilon} = 52$ Ом; мощности потерь в стали и механические $\Delta P_{ст} + \Delta P_{мех} = 3,2\% P_{2н}$.

Определить ток и ЭДС якоря, КПД генератора при номинальной нагрузке. Влиянием реакции якоря пренебречь.

Решение. 1. Ток якоря при номинальной нагрузке

$$I_{ян} = I_n + I_{вн} = P_n / U_n + U_n / R_{\epsilon} = 30 \cdot 10^3 / 230 + 230 / 52 = 134,86 \text{ А.}$$

2. ЭДС генератора при номинальной нагрузке

$$E_{я} = U_n + R_{я} I_{ян} = 230 + 0,09 \cdot 134,86 = 242,14 \text{ В.}$$

3. Потери мощности в цепи якоря

$$\Delta P_{я} = R_{я} I_{ян}^2 = 0,09 \cdot 134,86^2 = 1,637 \text{ кВт.}$$

4. Потери мощности в цепи возбуждения

$$\Delta P_{\epsilon} = R_{\epsilon} I_{вн}^2 = U_n^2 / R_{\epsilon} = 230^2 / 52 = 1,017 \text{ кВт.}$$

5. Потери мощности в стали и механические

$$\Delta P_{ст} + \Delta P_{мех} = 0,032 P_n = 0,032 \cdot 30 = 0,96 \text{ кВт.}$$

6. Механическая мощность на валу генератора

$$P_1 = P_{2н} + \Delta P = 30 + 1,637 + 1,017 + 0,96 = 38,61 \text{ кВт.}$$

7. КПД генератора при номинальной нагрузке

$$\eta_n = P_n / P_1 = 30 / 38,61 = 0,8925.$$

Пример 4. Двигатель постоянного тока параллельного возбуждения имеет следующие номинальные данные:

– мощность $P_n = 11$ кВт;

- напряжение сети $U_n = 220$ Вт;
- частота вращения якоря $n_n = 1500$ об/мин ;
- номинальный ток $I_n = 58$ А;
- сопротивления обмоток якоря и возбуждения:
 $R_{\text{я}} = 0,14$ Ом; $R_{\text{в}} = 80$ Ом.

Определить номинальный ток и ЭДС якоря, номинальный вращающий момент двигателя, электромагнитную мощность, пусковой ток якоря при пуске без пускового реостата и сопротивление пускового реостата для обеспечения пускового тока $I_{\text{ян}} = 2I_{\text{ян}}$.

Решение. 1. Номинальный ток цепи возбуждения

$$I_{\text{вн}} = U_n / R_{\text{в}} = 220 / 80 = 2,75 \text{ А.}$$

2. Номинальный ток цепи якоря

$$I_{\text{ян}} = I_n - I_{\text{вн}} = 58 - 2,75 = 55,25 \text{ А.}$$

3. ЭДС якоря

$$E_{\text{ян}} = U_n - R_{\text{я}} I_{\text{ян}} = 220 - 0,14 \cdot 55,25 = 212,26 \text{ В.}$$

4. Номинальный вращающий момент

$$M_n = 9,55 P_n / n_n = 9,55 \cdot 11000 / 1500 = 70,08 \text{ Нм.}$$

5. Номинальная электромагнитная мощность

$$P_{\text{эм}} = E_{\text{ян}} I_{\text{ян}} = 212,26 \cdot 55,25 = 11727 \text{ Вт} = 11,727 \text{ кВт.}$$

6. Пусковой ток якоря при пуске двигателя без реостата

$$I_{\text{ян}} = U_n / R_{\text{я}} = 220 / 0,14 = 1571,4 \text{ А.}$$

7. Пусковой ток при наличии пускового реостата

$$I'_{\text{ян}} = 2I_{\text{ян}} = 2 \cdot 55,25 = 110,5 \text{ А.}$$

8. Сопротивление пускового реостата при $I'_{\text{ян}} = 2I_{\text{ян}}$:

$$R_n = U_n / I'_{\text{ян}} - R_{\text{я}} = 220 / 110,5 - 0,14 = 1,851 \text{ Ом.}$$