

СОДЕРЖАНИЕ И ОБЪЕМ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ

В рамках контрольной работы выполняется решение задач разделов «Машины постоянного тока» и «Синхронные машины».

Решение требует анализа паспортных данных машин постоянного тока (МПТ) и синхронных машин для заданных вариантов. По результатам анализа необходимо понять, какие параметры допускают расчет по известным формулам, а какие требуют вычисления промежуточных параметров.

Объем контрольной работы должен соответствовать объему примера расчета, приведенного в методических указаниях.

ОФОРМЛЕНИЕ И СДАЧА КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ

Оформление контрольной работы начинается с текста варианта задания. Для быстрого восприятия задание дополнительно оформляется в виде «Дано:».

Решение должно содержать комментарии выполняемых действий, все параметры в буквенном обозначении должны иметь расшифровку и приводиться с единицами измерений. Рекомендуется деление всего расчета на пункты, в рамках которых выполняется расчет одного или нескольких взаимосвязанных величин. Необходимые схемы должны выполняться по правилам ЕСКД. Графики должны строиться с обозначением осей, на которых нанесена хорошо читаемая шкала.

ЗАДАНИЯ К КОНТРОЛЬНЫМ РАБОТАМ

Задача 1. Двигатель постоянного тока с параллельным возбуждением, номинальное напряжение которого $U_{\text{ном}}$, при номинальной нагрузке потребляет ток $I_{\text{ном}}$, а при холостом ходе I_0 . Номинальная частота вращения $n_{\text{ном}}$, сопротивление обмотки якоря $R_{\text{я}}$. Магнитные и механические потери принять постоянными при всех режимах работы двигателя (табл. 1).

Определить:

- номинальную мощность двигателя $P_{\text{ном}}$ на валу;
- номинальный КПД $\eta_{\text{ном}}$;
- значение пускового момента при токе $I_{\text{пуск}} = 2 \cdot I_{\text{ном}}$ и соответствующее сопротивление пускового реостата;
- частоту вращения якоря при $I_{\text{я ном}}$, но при введенном в цепь возбуждения добавочном сопротивлении, превышающем заданное в условии значение $R_{\text{в}}$ на 30%.

Построить естественную механическую характеристику двигателя.

Задача 2. Двигатель постоянного тока (ДПТ) с параллельным возбуждением, номинальное напряжение которого $U_{\text{ном}}$, развивает номинальную мощность $P_{\text{ном}}$. Номинальная частота вращения $n_{\text{ном}}$ и номинальный КПД $\eta_{\text{ном}}$. Потери мощности в цепи якоря $\Delta P_{\text{я}}$ и в цепи возбуждения $\Delta P_{\text{в}}$ заданы в процентах от потребляемой мощности двигателя $P_{\text{I ном}}$ (табл. 2).

Определить:

- ток в цепи возбуждения;
- ток якоря при номинальной нагрузке $I_{\text{я ном}}$;
- пусковой вращающий момент при пуске двигателя с пусковым реостатом;
- скорость вращения якоря при номинальном моменте на валу и вклю-

чении в цепь якоря добавочного сопротивления, равного $3R_{я}$.

Построить естественную и реостатную характеристики двигателя.

Задача 3. Рассчитать фазную и линейную ЭДС трехфазной синхронной машины при соединении фаз звездой с учетом первой, третьей, пятой и седьмой гармоник при частоте $f = 50$ Гц и форме магнитного поля, представленного на рис. 3.1а, б, в методических указаниях к задаче 3 и данных, представленных в таблице 3.

Таблица 1

Паспортные параметры двигателей к задаче 1

№ варианта	Параметры двигателей					
	$U_{ном}, В$	$I_{ном}, А$	$I_0, А$	$R_{я}, Ом$	$R_{св}, Ом$	$n_{ном},$ об/мин

28	220	2,8	2,10	11,78	120	1500
----	-----	-----	------	-------	-----	------

Таблица 2

Паспортные параметры двигателей к задаче 2

№ варианта	Параметры двигателей					
	$U_{\text{ном}}$, В	$P_{\text{ном}}$, кВт	$\Delta P_{\text{я}}$, %	$\Delta P_{\text{в}}$, %	$n_{\text{ном}}$, об/мин	$\eta_{\text{ном}}$, %

Окончание табл. 2

28	220	0,85	4,5	4,3	3500	64,0
----	-----	------	-----	-----	------	------

Таблица 3

Таблица параметров синхронных машин к задаче 3

№ варианта	Максимальная индукция B_{δ} , Т	Число пазов Z	Число пар полюсов p	Сокращение шага β	Полюсная дуга τ , см	Активная длина L , см	Число витков в одной ветви фазы w	№ рис. кривой поля
------------	----------------------------------------	-----------------	-----------------------	-------------------------	---------------------------	-------------------------	-------------------------------------	--------------------

28	0,95	72	3	5/6	60	40	20	1,а
----	------	----	---	-----	----	----	----	-----

ПРИМЕР ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Задача 1. Двигатель постоянного тока (ДПТ) с параллельным возбуждением, номинальное напряжение которого $U_{\text{ном}} = 220 \text{ В}$, при номинальной нагрузке потребляет ток $I_{\text{ном}} = 15 \text{ А}$, а при холостом ходе $I_0 = 1,6 \text{ А}$. Номинальная частота вращения $n_{\text{ном}} = 1025 \text{ об/мин}$, сопротивление обмотки якоря $R_{\text{я}} = 1,2 \text{ Ом}$, сопротивление цепи возбуждения $R_{\text{в}} = 180 \text{ Ом}$. Магнитные и механические потери принять постоянными при всех режимах работы двигателя.

Определить: 1) номинальную мощность двигателя на валу $P_{\text{ном}}$; 2) номинальный вращающий момент $M_{\text{ном}}$, номинальное значение КПД $\eta_{\text{ном}}$; 3) значение пускового момента $M_{\text{пуск}}$ при токе $I_{\text{пуск}} = 2I_{\text{ном}}$ и соответствующее значение сопротивления пускового реостата $R_{\text{р}}$; 4) частоту вращения якоря при $I_{\text{я ном}}$, но при введенном в цепь возбуждения добавочном сопротивлении, увеличивающем заданное в условии задачи значение $R_{\text{в}}$ на 30%.

Построить естественную механическую характеристику двигателя.

Решение.

По условию ДПТ с параллельным возбуждением включается в цепь:

- без внешних реостатов;
- с пусковым реостатом R_p ;
- с реостатом в цепи обмотки возбуждения R_B .

Схемы включения на рис. 1.1а, б, в.

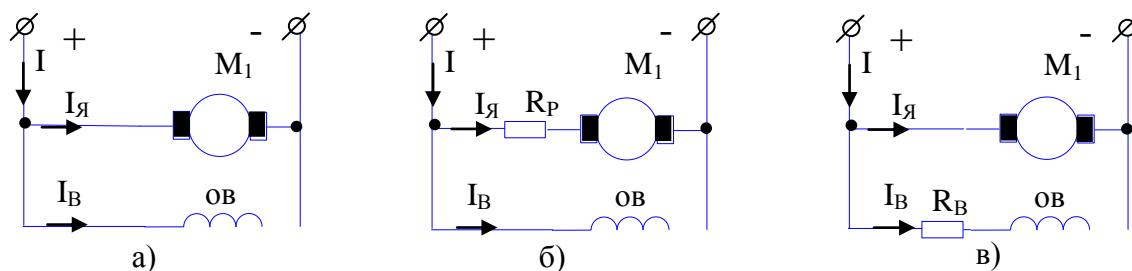


Рис. 1.1. Включение ДПТ с параллельным возбуждением в цепь:

а – без внешних реостатов; б – с реостатом в цепи якоря; в – с реостатом в цепи обмотки возбуждения

Расчет номинальной мощности, мощности потерь и момента

Номинальная мощность двигателя $P_{ном}$ есть полезная механическая мощность на валу $P_{ном} = P_{мех.ном}$. Ей соответствует номинальная электрическая $P_{эл. ном}$, которая превышает механическую на величину потерь $\Delta P_{ном}$:

$$P_{мех.ном} = P_{эл. ном} - \Delta P_{ном}, \quad (1.1)$$

Электрическая мощность определяется напряжением и током, то есть

$$P_{эл.ном} = U_{ном} \cdot I_{ном} = 220 \text{ В} \cdot 15 \text{ А} = 3300 \text{ Вт.}$$

Для любой нагрузки потери мощности в ДПТ

$$\Delta P = \Delta P_{эл.я} + \Delta P_{эл.в} + \Delta P_{маг} + \Delta P_{мех}. \quad (1.2)$$

Уравнение (1.2) можно записать для номинального режима (1.3) и холостого хода (1.4)

$$\Delta P_{ном} = \Delta P_{эл.я ном} + \Delta P_{эл.в ном} + \Delta P_{маг ном} + \Delta P_{мех ном}, \quad (1.3)$$

$$\Delta P_0 = \Delta P_{эл.я.0} + \Delta P_{эл.в.0} + \Delta P_{маг.0} + \Delta P_{мех.0}. \quad (1.4)$$

По условию магнитные и механические потери являются постоянными

$$\Delta P_{маг.0} + \Delta P_{мех.0} = \text{const}, \quad (1.5)$$

а электрические - переменными. Сумма (1.5) вычисляется из уравнения

(1.4):

$$\Delta P_{\text{маг.0}} + \Delta P_{\text{мех.0}} = \Delta P_0 - \Delta P_{\text{эл. я.0}} - \Delta P_{\text{эл. в.0}}, \quad (1.6)$$

где ΔP_0 – суммарные потери в режиме холостого хода (хх);

$\Delta P_{\text{эл. я.0}}$ – потери в обмотке якоря в режиме холостого хода;

$\Delta P_{\text{эл. в.0}}$ – потери в обмотке возбуждения в режиме холостого хода.

Потери холостого хода вычисляются по заданным значениям

$$\Delta P_0 = U_{\text{ном}} \cdot I_0 = 220 \text{ В} \cdot 1,6 \text{ А} = 352 \text{ Вт.}$$

Для рис. 1.1а ток холостого хода

$$I_0 = I_{\text{я.0}} + I_{\text{в.0}}, \quad (1.7)$$

где $I_{\text{в.0}} = \frac{U_{\text{ном}}}{R_{\text{я}}} = \frac{220 \text{ В}}{180 \text{ Ом}} = 1,222 \text{ А}$, тогда $I_{\text{я.0}} = I_0 - I_{\text{в.0}} = 1,6 \text{ А} - 1,222 \text{ А} = 0,378 \text{ А}$.

По закону Джоуля – Ленца любые электрические потери $\Delta P_{\text{эл.}} = I^2 \cdot R$, тогда для обмотки якоря $\Delta P_{\text{эл.я.0}} = (I_{\text{я.0}})^2 \cdot R_{\text{я}} = 0,378^2 \cdot 1,2 = 0,171 \text{ Вт}$, а для обмотки возбуждения $\Delta P_{\text{эл.в.0}} = (I_{\text{в.0}})^2 \cdot R_{\text{в}} = 1,222^2 \cdot 180 = 219,96 \approx 220 \text{ Вт}$.

Из уравнения (1.6) $\Delta P_{\text{маг.0}} + \Delta P_{\text{мех.0}} = 352 \text{ Вт} - 0,171 \text{ Вт} - 220 \text{ Вт} = 131,9 \text{ Вт} = \Delta P_{\text{маг.ном}} + \Delta P_{\text{мех.ном}}$.

При параллельном возбуждении по обмотке возбуждения протекает один и тот же ток во всех режимах, поэтому $\Delta P_{\text{эл.в.ном}} = \Delta P_{\text{эл.в.0}} = 220 \text{ Вт}$.

Номинальный ток якоря $I_{\text{я.ном}} = I_{\text{ном}} - I_{\text{в}} = 15 \text{ А} - 1,222 \text{ А} = 13,778 \text{ А}$, номинальные потери в обмотке якоря $\Delta P_{\text{эл.я.ном}} = (I_{\text{я.ном}})^2 \cdot R_{\text{я}} = 13,778^2 \cdot 1,2 = 227,8 \text{ Вт}$.

Все найденные составляющие потерь в номинальном режиме подставляем в уравнение (1.3), в результате $\Delta P_{\text{ном}} = 227,8 + 220 + 131,9 = 579,7 \text{ Вт}$.

Из уравнения (1.1) $P_{\text{мех.ном}} = P_{\text{эл.ном}} - \Delta P_{\text{ном}} = 3300 - 579,7 = 2720,3 \text{ Вт}$.

$$\text{КПД двигателя } \eta_{\text{ном}} = \frac{P_{\text{мехном}}}{P_{\text{эл.ном}}} = \frac{2720,3}{3300} = 0,824 \quad (82,4 \%).$$

$$\text{Номинальный момент двигателя } M_{\text{ном}} = 9,55 \cdot \frac{P_{\text{мехном}}}{n_2},$$

где n_2 – номинальная частота вращения. Тогда $M_{\text{ном}} = 9,55 \cdot \frac{2720,3}{1025} = 25,3 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

Расчет сопротивления реостата в цепи якоря

В момент пуска якорь находится в покое, ЭДС в якоре не наводится, поэтому пусковой ток двигателя при пуске без реостата (рис.1.1а)

$$I_{я.пуск} = \frac{U_{ном}}{R_я} = \frac{220}{1,2} = 183,3 \text{ А}, \text{ что в } \frac{183,3}{13,778} = 13,3 \text{ раза превышает ток якоря в но-}$$

минальном режиме.

Для снижения пускового тока в цепь якоря включается пусковой реостат R_p (см. рис. 1.1б), при этом $I_{пуск R} = 2 \cdot I_{ном} = 2 \cdot 15 \text{ А} = 30 \text{ А}$, а пусковой ток якоря $I_{я.пуск R} = 30 \text{ А} - I_b = 30 \text{ А} - 1,222 \text{ А} = 28,778 \text{ А}$. Для схемы рисунка 1.1б

$$R_я + R_p = \frac{U_{ном}}{I_{я.пуск R}} = \frac{220 \text{ В}}{28,778 \text{ А}} = 7,64 \text{ Ом} \text{ и тогда } R_p = 7,64 - 1,2 = 6,44 \text{ Ом}.$$

Расчет пускового момента

Момент двигателя постоянного тока

$$M = C_M \cdot \Phi \cdot I_я, \quad (1.8)$$

где C_M – конструктивная постоянная двигателя по моменту;

Φ – магнитный поток обмотки возбуждения статора;

$I_я$ – ток якоря.

Уравнение (1.8) справедливо для любых режимов, поэтому может быть записано для номинального (1.9) и пускового режимов с реостатом (1.10).

$$M_{ном} = C_M \cdot \Phi \cdot I_{я ном}. \quad (1.9)$$

$$M_{пуск R} = C_M \cdot \Phi \cdot I_{я пуск R} \quad (1.10)$$

Из отношения уравнений (1.9) и (1.10) следует: $\frac{M_{ном}}{M_{пуск R}} = \frac{I_{я ном}}{I_{я пуск R}}$, откуда

$$M_{пуск R} = M_{ном} \cdot \frac{I_{я пуск R}}{I_{я ном}} = 25,3 \cdot \frac{28,778}{15} = 48,5 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Расчет момента двигателя с реостатом R_b в цепи обмотки возбуждения

Включение реостата R_b в цепь обмотки возбуждения (см. рис.1.1в) приводит к уменьшению тока возбуждения I_b , а значит к уменьшению потока возбуждения Φ_b . Расчет основан на применении формулы момента

(1.9), записанной для номинального момента $M_{НОМ}$ и момента при ослабленном магнитном потоке $\Phi_{R\delta}$

$$M_{НОМ} = C_M \cdot \Phi \cdot I_{Я\text{НОМ}}, \quad (1.11)$$

$$M_{R\delta} = C_M \cdot \Phi_{R\delta} \cdot I_{Я\text{НОМ}}. \quad (1.12)$$

Из (1.11) и (1.12) следует

$$\frac{M_{НОМ}}{M_{R\delta}} = \frac{\Phi}{\Phi_{R\delta}}. \quad (1.14)$$

Далее следует полагать, что магнитный поток не достигает насыщения и пропорционален намагничивающему току $I_{\text{в}}$, то есть $\Phi = k \cdot I_{\text{в.НОМ}}$, а $\Phi_{R\delta} = k \cdot I_{R\delta}$. Тогда

$\frac{M_{НОМ}}{M_{R\delta}} = \frac{I_{\text{в.НОМ}}}{I_{R\delta}}$, откуда следует момент двигателя при ослабленном магнитном потоке

$$M_{R\delta} = M_{НОМ} \cdot \frac{I_{R\delta}}{I_{\text{в.НОМ}}}. \quad (1.15)$$

Значения токов возбуждения в обоих случаях определяются по закону Ома:

$$\left. \begin{aligned} I_{\text{в.НОМ}} &= \frac{U}{R_{\delta}} \\ I_{R\delta} &= \frac{U}{R_{\delta} + 0,3 \cdot R_{\delta}} \end{aligned} \right\} \longrightarrow \frac{I_{R\delta}}{I_{\text{в.НОМ}}} = \frac{R_{\delta}}{1,3 \cdot R_{\delta}} = \frac{1}{1,3}. \quad (1.16)$$

Подставляя (1.16) в (1.15), вычисляется момент при ослабленном потоке

$$M_{R\delta} = \frac{M_{НОМ}}{1,3} = \frac{25,3}{1,3} = 19,46 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Построение естественной механической характеристики двигателя

Механическая характеристика есть зависимость частоты вращения n от момента M на валу двигателя, то есть $n = f(M)$. Характеристика называется естественной при отсутствии реостатов в цепях якоря и обмотки возбуждения. Механическая характеристика является прямой линией и может быть построена по двум точкам. Одна из точек соответствует номинальному режиму, для которого $n_{НОМ} = 1025$ об/мин по условию, а момент $M_{НОМ} =$

25,3 Н·м по результатам расчета. Вторая точка выбирается для режима холостого хода, при котором $M_0 = 0$, а частота n_0 должна быть рассчитана.

Расчет основан на уравнении электрического состояния (1.17) и уравнении ЭДС обмотки якоря (1.18)

$$U = E + I_{\text{я}} \cdot R_{\text{я}}, \quad (1.17)$$

$$E = C_e \cdot \Phi \cdot n, \quad (1.18)$$

из которых следует: $U = C_e \cdot \Phi \cdot n + I_{\text{я}} \cdot R_{\text{я}}$ и $n = \frac{U - I_{\text{я}} \cdot R_{\text{я}}}{C_e \cdot \Phi}$. (1.19)

Уравнение (1.19) справедливо для всех режимов, в частности для номинального и холостого хода ($I_{\text{я}0} = 0$)

$$\left. \begin{aligned} n_{\text{ном}} &= \frac{U_{\text{ном}} - I_{\text{яном}} \cdot R_{\text{я}}}{C_e \cdot \Phi} \\ n_0 &= \frac{U_{\text{ном}} - 0 \cdot R_{\text{я}}}{C_e \cdot \Phi} \end{aligned} \right\} \longrightarrow \begin{aligned} \frac{n_0}{n_{\text{ном}}} &= \frac{U_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}} - I_{\text{яном}} \cdot R_{\text{я}}} \\ \text{или} & \end{aligned}$$

$$n_0 = n_{\text{ном}} \cdot \frac{U_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}} - I_{\text{яном}} \cdot R_{\text{я}}} = 1025 \cdot \frac{220}{220 - 13,778 \cdot 1,2} = 1108 \text{ об/мин.}$$

Таким образом, координаты точек: 1) (25,3; 1025); 2) (0; 1108). Механическая характеристика, построенная в программе Mathcad по этим точкам, приведена на рисунке 1.2.

Расчет частоты вращения якоря при ослабленном магнитном потоке

Расчет подготовлен преобразованиями в предыдущих пунктах. Уравнение (1.19) необходимо записать дважды: для номинального режима и режима с ослабленным магнитным потоком $\Phi_{\text{Рв}}$, при включении реостата $R_{\text{в}}$ в цепь обмотки возбуждения (см. рис. 1.1в).

$$\left. \begin{aligned} n_{\text{ном}} &= \frac{U_{\text{ном}} - I_{\text{яном}} \cdot R_{\text{я}}}{C_e \cdot \Phi} \\ n_{\text{Рв}} &= \frac{U_{\text{ном}} - I_{\text{яном}} \cdot R_{\text{я}}}{C_e \cdot \Phi_{\text{Рв}}} \end{aligned} \right\} \longrightarrow \frac{n_{\text{Рв}}}{n_{\text{ном}}} = \frac{(U_{\text{ном}} - I_{\text{яном}} \cdot R_{\text{я}}) \cdot (C_t \cdot \Phi)}{(C_t \cdot \Phi_{\text{Рв}}) \cdot (U_{\text{ном}} - I_{\text{яном}} \cdot R_{\text{я}})} = \frac{\Phi}{\Phi_{\text{Рв}}} = 1,3$$

В итоге $n_{\text{Рв}} = 1,3 \cdot n_{\text{ном}} = 1,3 \cdot 1025 = 1332,5 \text{ об/мин.}$

$$M := \begin{pmatrix} 25.3 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$n := \begin{pmatrix} 1025 \\ 1108 \end{pmatrix}$$

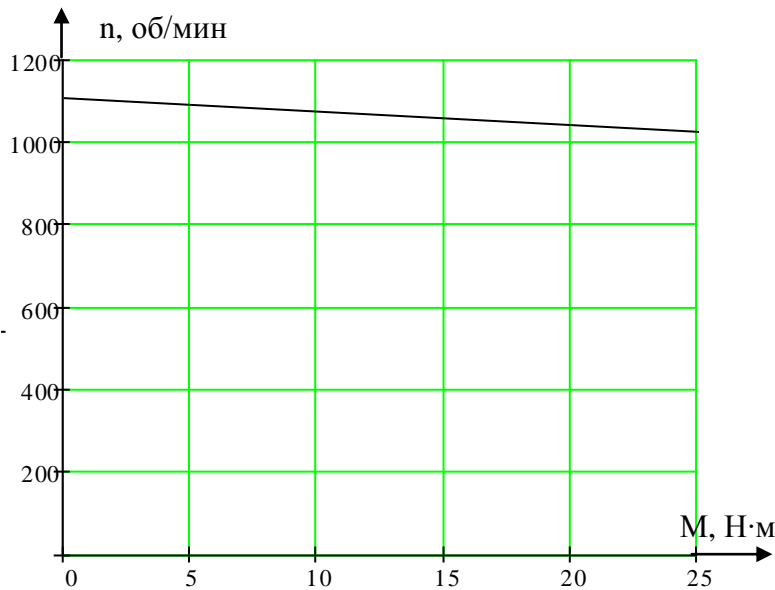


Рис. 1.2. Естественная механическая характеристика, построенная в программе Mathcad

Задача 2. Двигатель параллельного возбуждения, номинальное напряжение которого $U_{\text{ном}} = 110$ В, развивает номинальную мощность $P_{\text{ном}} = 60$ кВт. Номинальная частота вращения $n_{\text{ном}} = 980$ об/мин и номинальный КПД $\eta_{\text{ном}} = 86,5$ %. Потери мощности в цепи якоря $\Delta P_{\text{я}} = 5,2$ % и в цепи возбуждения $\Delta P_{\text{в}} = 4,8$ % заданы в процентах от потребляемой мощности двигателя $P_{1\text{ном}}$.

Определить:

- ток в цепи возбуждения $I_{\text{в}}$;
- ток якоря при номинальной нагрузке $I_{\text{я ном}}$;
- пусковой вращающий момент при пуске двигателя с пусковым реостатом $R_{\text{р}}$;
- скорость вращения якоря $n_{\text{рп}}$ при номинальном моменте на валу и включении в цепь якоря добавочного сопротивления, равного $3R$.

Построить естественную $n = f(M)$ и реостатную $n_{\text{рп}} = f(M)$ характеристики двигателя.

Решение.

По условию ДПТ с параллельным возбуждением включается в цепь:

- без внешних реостатов;
- с пусковым реостатом R_P .

Схемы включения на рис. 2.1а, б.



Рис. 2.1. Включение ДПТ с параллельным возбуждением в цепь:

а – без внешних реостатов; б – с реостатом в цепи якоря

Расчет тока возбуждения двигателя

Расчет тока возбуждения требует вычисления ряда дополнительных параметров на основе электрической мощности двигателя $P_{эл.ном}$. По условию задана полезная (механическая) мощность $P_{ном} = P_{мех.ном}$.

По определению КПД двигателя

$$\eta_{ном} = \frac{P_{мех.ном}}{P_{эл.ном}} \rightarrow P_{эл.ном} = \frac{P_{мех.ном}}{\eta_{ном}} = \frac{60 \text{ кВт}}{0,865} = 69,36 \text{ кВт}.$$

Потери мощности в обмотке возбуждения

$$\Delta P_B = 0,048 \cdot P_{эл.ном} = 0,048 \cdot 69,36 = 3,33 \text{ кВт},$$

а в обмотке якоря

$$\Delta P_я = 0,052 \cdot P_{эл.ном} = 0,052 \cdot 69,36 = 3,61 \text{ кВт}.$$

Потери мощности в обмотке возбуждения можно определить через номинальные значения напряжения и тока $\Delta P_B = U_{ном} \cdot I_{в.ном}$, откуда ток возбуждения

$$I_{в.ном} = \frac{\Delta P_B}{U_{ном}} = \frac{3330 \text{ Вт}}{110 \text{ В}} = 30,27 \text{ А}.$$

Расчет номинального и пускового токов якоря двигателя

В номинальном режиме двигатель потребляет ток

$$I_{ном} = \frac{P_{эл.ном}}{U_{ном}} = \frac{69360 \text{ Вт}}{110 \text{ В}} = 630,55 \text{ А}.$$

Из схемы включения при параллельном возбуждении

$$I_{я.ном} = I_{ном} - I_{в.ном} = 630,55 - 30,27 = 600,28 \text{ А}.$$

В режиме пуска ток якоря определяется только сопротивлением обмотки якоря $R_{я}$, которое постоянно и равно сопротивлению в номинальном режиме. По закону Джоуля-Ленца

$$\Delta P_{я.ном} = (I_{я.ном})^2 \cdot R_{я}, \text{ откуда } R_{я} = \frac{\Delta P_{я.ном}}{(I_{я.ном})^2} = \frac{3610}{(600,28)^2} = 0,01 \text{ Ом}.$$

По закону Ома для режима пуска

$$I_{я.пуск} = \frac{U_{ном}}{R_{я.ном}} = \frac{110 \text{ В}}{0,01 \text{ Ом}} = 11000 \text{ А}$$

Расчет номинального и пускового моментов

По литературным данным двигатель развивает момент

$$M = 9,55 \cdot \frac{P_{мех}}{n} . \quad (2.1)$$

Момент двигателя в номинальном режиме

$$M_{ном} = 9,55 \cdot \frac{P_{мех.ном}}{n_{ном}} = 9,55 \cdot \frac{60000}{980} = 584,7 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Механический момент $M_{ном}$ двигателя вызывается электромагнитным моментом $M_{эл.маг}$, который определяется током якоря $I_{я}$ и магнитным потоком Φ обмотки возбуждения

$$M_{эл.маг} = M = C_M \cdot \Phi \cdot I_{я}, \quad (2.2)$$

где C_M – конструктивный коэффициент двигателя по моменту.

Уравнение (2.2) момента справедливо для любых режимов, включая номинальный и пусковой, для которых

$$\begin{cases} M_{ном} = C_M \cdot \Phi \cdot I_{я.ном} \\ M_{пуск} = C_M \cdot \Phi \cdot I_{я.пуск} \end{cases} \quad (2.3)$$

Решая систему (2.3), получим

$$\frac{M_{ном}}{M_{пуск}} = \frac{I_{яном}}{I_{япуск}}, \text{ откуда } M_{пуск} = M_{ном} \cdot \frac{I_{япуск}}{I_{яном}} = 584,7 \cdot \frac{11000}{600,28} = 10714,5 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

Расчет скорости вращения якоря при номинальном моменте и добавочном сопротивлении в цепи якоря

Частота вращения якоря определяется выражением $n = \frac{U_{ном} - I_{я} \cdot R_{я}}{C_e \cdot \Phi}$. (2.4)

При включении добавочного сопротивления $3 \cdot R_{я}$ в цепь якоря частота вращения

$$n_{3R} = \frac{U_{ном} - I_{я3R} \cdot (R_{я} + 3 \cdot R_{я})}{C_e \cdot \Phi}. \quad (2.5)$$

Номинальному току якоря $I_{я} = I_{яном}$ соответствует момент

$$M_{ном} = C_M \cdot \Phi \cdot I_{яном}. \quad (2.6)$$

Выполнение условия $M_{ном} = M_{3R}$, согласно уравнению момента (2.6) ($C_M \cdot \Phi = \text{const}$), возможно только при $I_{я3R} = I_{яном}$, тогда уравнение (2.5) запишется в виде

$$n_{3R} = \frac{U_{ном} - I_{яном} \cdot (R_{я} + 3 \cdot R_{я})}{C_e \cdot \Phi}, \quad (2.7)$$

где $C_e \cdot \Phi$ - величина постоянная при всех режимах рассматриваемого включения.

Для номинального режима без добавочного сопротивления

$$n_{ном} = \frac{U_{ном} - I_{яном} \cdot R_{я}}{C_e \cdot \Phi}. \quad (2.8)$$

Отношение частот на основе уравнений (2.7) и (2.8)

$$\frac{n_{3R}}{n_{ном}} = \frac{U_{ном} - I_{яном} \cdot (R_{я} + 3 \cdot R_{я})}{C_e \cdot \Phi} \cdot \frac{C_e \cdot \Phi}{U_{ном} - I_{яном} \cdot R_{я}} = \frac{U_{ном} - I_{яном} \cdot (4 \cdot R_{я})}{U_{ном} - I_{яном} \cdot R_{я}},$$

и тогда $n_{3R} = n_{ном} \cdot \frac{U_{ном} - I_{яном} \cdot (4 \cdot R_{я})}{U_{ном} - I_{яном} \cdot R_{я}} = 980 \cdot \frac{110 - 600,28 \cdot 4 \cdot 0,01}{110 - 600,28 \cdot 0,01} = 818,2 \text{ об/мин.}$

Построение естественной и искусственной характеристик

Построение характеристик $n = f(M)$ $n_{3R} = f(M)$ подготовлено предшествующими расчетами. Обе характеристики являются прямыми, выходя-

щими из одной точки n_0 на оси частоты вращения. Точка соответствует режиму холостого хода, для которого момент $M_0 = 0$, а ток $I_{Я0} = 0$. Частоту вращения холостого хода n_0 можно вычислить через номинальное значение $n_{ном}$ на основе уравнения (2.4), записанного для двух режимов

$$\left. \begin{aligned} n_0 &= \frac{U_{ном} - I_{Я0} \cdot R_{Я}}{C_e \cdot \Phi} \\ n_{ном} &= \frac{U_{ном} - I_{Яном} \cdot R_{Я}}{C_e \cdot \Phi} \end{aligned} \right\} \rightarrow \frac{n_0}{n_{ном}} = \frac{U_{ном} - I_{Я0} \cdot R_{Я}}{C_e \cdot \Phi} \cdot \frac{C_e \cdot \Phi}{U_{ном} - I_{Яном} \cdot R_{Я}} = \frac{U_{ном} - 0}{U_{ном} - I_{Яном} \cdot R_{Я}}$$

$$n_0 = n_{ном} \cdot \frac{U_{ном} - 0}{U_{ном} - I_{Яном} \cdot R_{Я}} = 980 \cdot \frac{110}{110 - 600,28 \cdot 0,01} = 1036,6 \text{ об/мин.}$$

Таким образом, координаты точек: 1) $M_0 = 0$, $n_0 = 1036,6$; 2) $M_{ном} = 584,7$, $n_{ном} = 980$; 3) $M_{ном} = 584,7$, $n_{3R} = 818,2$. Механическая характеристика, построенная в программе Mathcad по этим точкам, приведена на рисунке 2.2.

$$M := \begin{pmatrix} 0 \\ 587.7 \end{pmatrix} \quad n := \begin{pmatrix} 1036.6 \\ 980 \end{pmatrix} \quad n1 := \begin{pmatrix} 1036.6 \\ 818.2 \end{pmatrix}$$

Координаты рассчитанных точек в программе Mathcad.

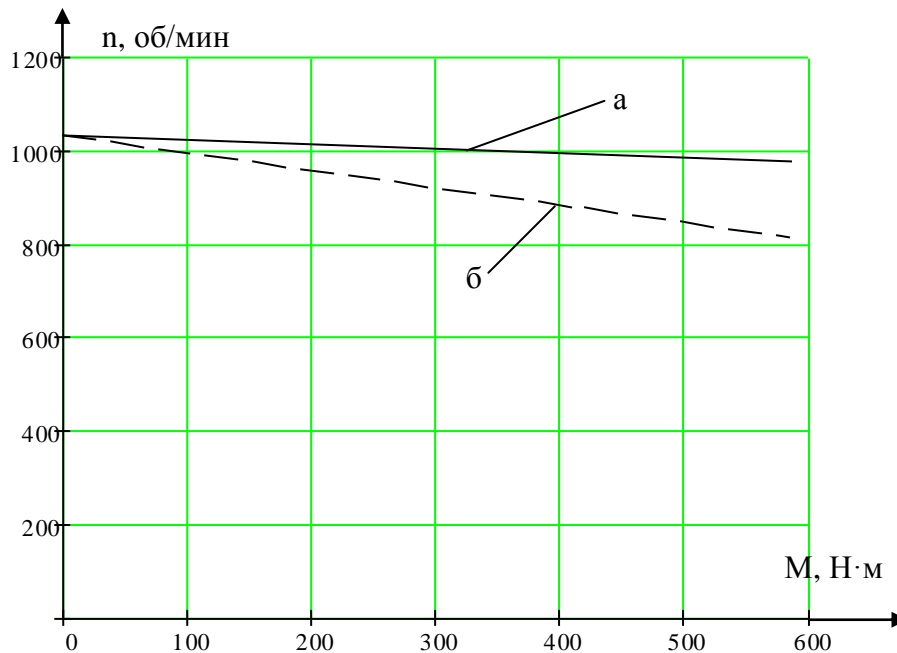


Рис. 2.2. Механические характеристики ДПТ к задаче 2, построенные в программе Mathcad: а – естественная; б - искусственная

Задача 3. К задаче 3 пример решения не приводится, но ниже дается методика решения.

Методические указания к задаче 3

Расчет гармонических составляющих фазных ЭДС

Фазная ЭДС для любой гармонической составляющей

$$E_v = 4,44 \cdot f_v \cdot w \cdot k_{ov} \cdot \Phi_v, \text{ В},$$

где k_{ov} – обмоточный коэффициент для v – й гармоники;

w – число последовательно соединенных витков одной фазы;

Φ_v – магнитный поток каждой из гармонических;

f_v – частота ЭДС v – й гармоники.

Расчет обмоточных коэффициентов

Обмоточный коэффициент:

$$k_{ov} = k_{pv} \cdot k_{yv},$$

где k_{pv} – коэффициент распределения для v – й гармоники (при фазной зоне 60°):

$$k_{pv} = \frac{\text{Sin}\left(\frac{\pi}{2m_1} \cdot v\right)}{q_1 \cdot \text{Sin}\left(\frac{\pi}{2m_1 \cdot q_1} \cdot v\right)} = \frac{\text{Sin}\left(\frac{\pi}{6} \cdot v\right)}{q_1 \cdot \text{Sin}\left(\frac{\pi}{6 \cdot q_1} \cdot v\right)}.$$

Коэффициент укорочения для каждой из гармонических:

$$k_{yv} = \text{Sin}\left(\frac{\pi}{2} \cdot \beta \cdot v\right).$$

Частота каждой из гармонических:

$$f_v = f \cdot v, \text{ с}^{-1},$$

где v – номер гармонической составляющей ЭДС.

Расчет гармонических составляющих магнитного потока

Магнитный поток каждой из гармонических составляющих:

$$\Phi_v = (2/\pi) \cdot B_v \cdot L \cdot \tau_v, \text{ Вб},$$

где $\tau_v = \frac{\tau}{v}$;

τ_v – полюсное деление (дуга) для каждой гармонической, м;

τ - полюсное деление (дуга) машины, м;

L – активная длина статора, м;

B_v – максимальная индукция для каждой из гармонических, которая определяется для каждой гармонической по кривой поля.

Распределение индукции магнитного поля B вдоль воздушного зазора между статором и ротором задано для трех вариантов на рис. 3.1а, б, в.

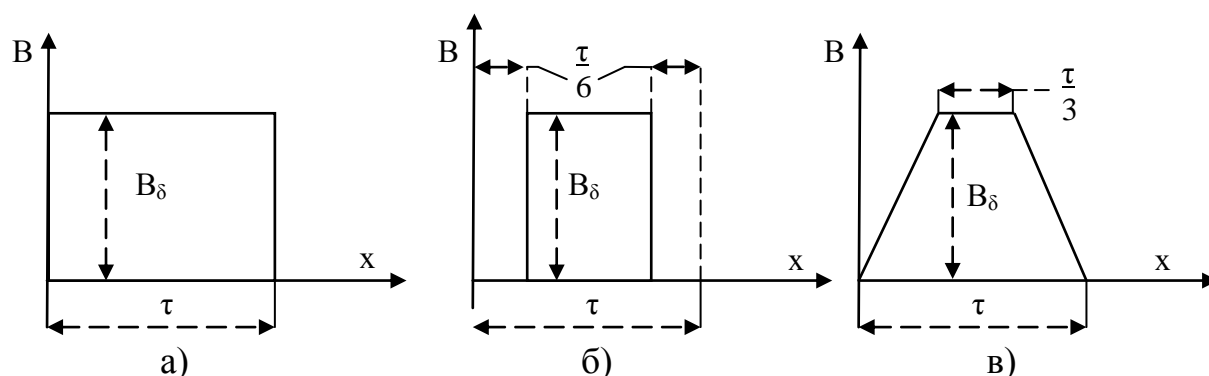


Рис. 3.1. Кривая распределения магнитной индукции в воздушном зазоре машины

Расчет гармонических составляющих амплитуд магнитной индукции

а. Разложение индукции в ряд Фурье по гармоническим составляющим для рис. 3.1а:

$$B = \frac{4}{\pi} \cdot B_{\delta} \cdot \left(\sin x + \frac{1}{3} \sin 3x + \frac{1}{5} \sin 5x + \frac{1}{7} \sin 7x + \dots \right).$$

Отсюда амплитуда магнитной индукции первой гармоники: $B_{\delta 1} = \frac{4}{\pi} \cdot B_{\delta}$;

третьей: $B_{\delta 3} = \frac{1}{3} \cdot \frac{4}{\pi} \cdot B_{\delta}$;

пятой: $B_{\delta 5} = \frac{1}{5} \cdot \frac{4}{\pi} \cdot B_{\delta}$;

седьмой: $B_{\delta 7} = \frac{1}{7} \cdot \frac{4}{\pi} \cdot B_{\delta}$

б. Разложение индукции в ряд Фурье по гармоническим составляющим для рис. 3.1б:

$$B = \frac{4}{\pi} \cdot B_{\delta} \cdot \left(\cos \alpha \cdot \sin x + \frac{1}{3} \cos 3\alpha \cdot \sin 3x + \frac{1}{5} \cos 5\alpha \cdot \sin 5x + \frac{1}{7} \cos 7\alpha \cdot \sin 7x + \dots \right).$$

Если машина имеет одну пару полюсов ($p = 1$), то полюсное деление машины $\tau = \pi$. Тогда для рис. 3.1б угол $\alpha = \frac{\pi}{6}$, а $\cos \alpha = \frac{\sqrt{3}}{2}$, $\cos 3\alpha = 0$, $\cos 5\alpha = \frac{\sqrt{3}}{2}$, $\cos 7\alpha = \frac{\sqrt{3}}{2}$.

В результате, для $p = 1$ амплитуда магнитной индукции:

- первой гармоники $B_{\delta 1} = \frac{4}{\pi} \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot B_{\delta}$;

- третьей $B_{\delta 3} = 0$;

- пятой $B_{\delta 5} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{4}{\pi} \cdot B_{\delta}$;

- седьмой $B_{\delta 7} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{4}{\pi} \cdot B_{\delta}$.

Если машина имеет две пары полюсов ($p = 2$), то полюсное деление машины $\tau = \pi/2$. Тогда угол $\alpha = \frac{\pi}{12}$, а $\cos \alpha = 0,97$, $\cos 3\alpha = 0,707$, $\cos 5\alpha = 0,26$, $\cos 7\alpha = -0,26$. По полученным значениям косинусов углов вычисляются составляющие $B_{\delta 1}$, $B_{\delta 3}$, $B_{\delta 5}$, $B_{\delta 7}$.

Аналогично вычисляются углы и составляющие магнитной индукции при $p = 3$ и $p = 4$.

в. *Разложение индукции в ряд Фурье по гармоническим составляющим для рис. 3.1в:*

$$B = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{B_{\delta}}{\alpha} \cdot \left(\sin \alpha \cdot \sin x - \frac{1}{9} \sin 3\alpha \cdot \sin 3x + \frac{1}{25} \sin 5\alpha \cdot \sin 5x - \frac{1}{49} \sin 7\alpha \cdot \sin 7x + \dots \right).$$

Так как при $p = 1$ значение $\tau = \pi$, то для рис. 3.1в угол $\alpha = \frac{\pi}{3}$, а $\sin \alpha = \frac{\sqrt{3}}{2}$, $\sin 3\alpha = 0$, $\sin 5\alpha = \frac{1}{2}$, $\sin 7\alpha = \frac{\sqrt{3}}{2}$.

Тогда при $p = 1$ амплитуда магнитной индукции:

- первой гармоники $B_{\delta 1} = 1,06 \cdot B_{\delta}$;

- третьей $B_{\delta 3} = 0$;

- пятой $B_{\delta 5} = 0,025 \cdot B_{\delta}$;

- седьмой: $B_{\delta 7} = 0,022 \cdot B_{\delta}$.

При $p = 2$ полюсное деление машины $\tau = \pi/2$. Тогда угол $\alpha = \frac{\pi}{6}$, а $\sin \alpha = 0,5$, $\sin 3\alpha = 1$, $\sin 5\alpha = 0,5$, $\sin 7\alpha = -0,5$. По полученным значениям синусов углов вычисляются составляющие $B_{\delta 1}$, $B_{\delta 3}$, $B_{\delta 5}$, $B_{\delta 7}$.

Аналогично вычисляются углы и составляющие магнитной индукции при $p = 3$ и $p = 4$.

Расчет линейной и фазной ЭДС по найденным гармоническим

$$\text{Фазная ЭДС } E = \sqrt{E_1^2 + E_3^2 + E_5^2 + E_7^2 + \dots},$$

где E_1, E_3, E_5, E_7 - фазная ЭДС каждой из гармонических.

$$\text{Линейная ЭДС при соединении фаз звездой } E_{\text{л}} = \sqrt{3} \cdot \sqrt{E_1^2 + E_5^2 + E_7^2 + \dots}.$$

В линейную ЭДС при соединении фаз звездой гармонические, кратные трем, не входят.

ЛИТЕРАТУРА

Основная:

1. Набиев Ф.М. Электрические машины: учеб. пособие для вузов. -2-е изд./ Ф.М. Набиев, И.И. Алиев. – М.: РадиоСофт, 2014. – 256 с.

2. Алиев И.И. Электрические машины: учеб. пособие для вузов. / И.И. Алиев.– СПб.: Питер, 2014. – 448 с.

Дополнительная:

3. Вольдек А.И. Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы: учебник для вузов / А.И. Вольдек. – СПб.: Питер, 2007. – 320 с.

4. Вольдек А.И. Электрические машины. Машины переменного тока: учебник для вузов / А.И. Вольдек. – СПб.: Питер, 2007. – 350 с.