

Министерство науки и высшего образования РФ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Пермский национальный исследовательский политехнический университет»
Кафедра микропроцессорных средств автоматизации

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРИВОД

Методические указания
выполнению и оформлению расчётно-графической работы

Пермь 2022

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ И РЕКОМЕНДАЦИИ ПО МЕТОДИКЕ РАБОТЫ НАД ЗАДАНИЯМИ И ПО ИХ ОФОРМЛЕНИЮ

- ❖ Задание 1. Расчет электропривода с двигателем постоянного тока независимого возбуждения.
- ❖ Задание 2. Расчет электропривода переменного тока с асинхронным двигателем.

Варианты исходных данных для контрольного задания №1 приведены в табл. 1 и табл. 2, а варианты двигателей к контрольному заданию №2 – соответственно в табл. 3 и табл. 2. По первой цифре варианта выбирается двигатель и его технические данные по табл. 1 (задание №1) и табл. 3 (задание №2), по второй цифре варианта выбираются коэффициенты из табл. 2.

В целях облегчения работы после каждого задания приведены методические указания и сделаны ссылки на соответствующую литературу.

Начинать работу над заданиями, не представляя, что от Вас требуется, не следует. Необходимо внимательно разобраться в исходной информации, проработать соответствующий материал по рекомендованной литературе. Следует сразу же вести аккуратный черновик, для которого лучше всего подходит отдельная тетрадь или блокнот. Использование отдельных листков приводит чаще всего к их утере или к нарушению порядка расчетов и записей, которые трудно затем восстановить. Писать следует на одной стороне листа черновой тетради. Вторая сторона пригодится для дополнительных расчетов, замечаний, пересчетов.

Контрольные задания нужно выполнять в тетрадях или на стандартных листах писчей бумаги. Оформление выполненных заданий, условные обозначения величин и т.п. должны соответствовать ГОСТам, расчеты следует вести в системе СИ. При расчетах характеристик необходимо делать подробный расчет только для характерных точек каждой из них. Результаты остальных расчетов следует сводить в таблицу. При оформлении всех расчетов рекомендуется сначала писать расчетную формулу, затем – числовые значения величин, входящих в нее, и далее – конечный результат (с указанием размерности полученной величины). Если эти числовые значения берутся из графика или какой-либо таблицы, необходимо делать на них соответствующие ссылки. Результаты всех аналогичных расчетов следует сводить в таблицы. Но каждый раз, когда в расчетную формулу будут входить величины с иными индексами или знаками, необходимо приводить эту формулу, подставлять в нее соответствующие цифровые значения, давать конечный результат, а результаты аналогичных расчетов сводить в таблицы. Целесообразно, получив таблицу, сразу же построить график искомой зависимости. Следует выбирать масштаб графиков, удобный для построения и считывания промежуточных значений связанных величин: лучше всего кратный 2, 5, 10.

Расчетные формулы и другие материалы, взятые из литературных источников, нужно давать со ссылкой на источник, указываемый в квадратных скобках номером, под которым этот источник значится в перечне литературы. В перечне необходимо указывать фамилию и инициалы авторов, название источника, издательство и год издания.

Расчетные, принципиальные и структурные схемы, графики характеристик, временные диаграммы должны быть выполнены на миллиметровой бумаге, пронумерованы, иметь пояснительные надписи, в соответствующих местах на них

необходимо делать ссылки. Все характеристики двигателей следует изображать на одном графике.

В случае затруднений при выполнении контрольных заданий за консультациями следует обращаться на кафедру МСА ПНИПУ.

КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ИХ ВЫПОЛНЕНИЮ

Контрольное задание 1

Для электропривода постоянного тока с двигателем независимого возбуждения, тип и механические данные которого приведены в табл. 1, требуется:

1. Изобразить структурную схему двигателя, определить его параметры и записать уравнения динамической механической характеристики двигателя в осях α, β .

2. Рассчитать и построить естественные статические электромеханическую $\omega = f(I_a)$ и механическую $\omega = f(M)$ характеристики в абсолютных единицах.

3. Рассчитать и построить искусственные реостатные характеристики $\omega = f(I_a)$ и $\omega = f(M)$, проходящие через точку с координатами $\omega_u = a \cdot \omega_n$; $M_H = b \cdot M_n$, где a, b – коэффициенты, значения которых приведены в табл. 2. Определить величину сопротивления, которое необходимо ввести в цепь якоря для обеспечения работы двигателя в заданной точке.

4. Рассчитать и построить искусственные статические характеристики $\omega = f(I_a)$ и $\omega = f(M)$ двигателя при ослаблении магнитного потока. Характеристики должны проходить через точку с $\omega_u = a_1 \cdot \omega_n$; $M_H = b_1 \cdot M_n$. Значения коэффициентов a_1 и b_1 приведены в табл. 2.

5. Рассчитать и построить искусственные статические характеристики $\omega = f(I_a)$ и $\omega = f(M)$ при пониженном напряжении на якоре. Характеристики должны проходить через точку с $\omega_u = a_2 \cdot \omega_n$; $M_H = b_2 \cdot M_n$. Значения коэффициентов a_2 и b_2 приведены в табл. 2.

6. Рассчитать и построить механическую характеристику $\omega = f(M)$ двигателя при динамическом торможении, проходящую через точку с $\omega_u = a_3 \cdot \omega_n$; $M_H = b_3 \cdot M_n$. Значения коэффициентов a_3 и b_3 приведены в табл. 2. Определить величину тормозного сопротивления, на которое должен быть замкнут якорь двигателя.

7. Рассчитать величину тормозного сопротивления, которое следует включить в цепь якоря для перевода двигателя в режим противовключения при $J_{HAC} = J_{доп} = 2 \cdot J_H$ и $\omega_{HAC} = 0,95 \cdot \omega_n$.

8. Определить скорость двигателя при рекуперативном спуске груза и моменте двигателя, равном $1,5 M_n$. Работа на естественной характеристике.

9. Рассчитать и построить пусковую диаграмму двигателя при его пуске в 4 ступени. Определить пусковое сопротивление и сопротивление ступеней. Пуск форсированный, $M_c = M_n$.

Таблица №1 Основные технические данные двигателей постоянного тока
(возбуждение независимое)

Параметры	Номер варианта									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Тип двигателя	Д-12	Д-21	Д31	Д41	П22	П32	П71	Д808	Д810	Д812
Номинальная мощность P_n , кВт	2,5	4,5	6,7	15	1	2,2	19	37	55	70
Номинальное напряжение U_n , В	220	220	440	440	220	220	220	220	220	440
Номинальный ток I_n , А	14,6	26	19	40	5,9	12,2	103	192	280	176
Номинальная скорость n_n , об/мин	1180	1030	875	695	1500	1500	1500	575	550	520
Сопротивление обмотки возбуждения r_b , Ом	270	136,4	122	70	712	358	76,8	44,4	46,2	34,4
Максимально допустимая скорость вращения n_{\max} , об/мин.	3600	3600	3600	3600	3000	3000	2250	2300	2200	1900
Момент инерции J , кг·м ²	0,05	0,125	0,3	0,8	0,055	0,116	1,4	2,0	3,6	7,0
Число пар полюсов p_n	2	2	2	2	1	1	2	2	2	2
Число пар параллельных ветвей, a	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Число витков обмотки возбуждения W на полюс	1800	1790	1870	1480	4800	3600	1250	1250	1500	1350
Число активных проводников N якоря	990	920	1476	984	1728	936	396	278	234	418

Примечание: двигатели допускают увеличение скорости в 2 раза за счет ослабления магнитного потока. При этой скорости максимальный вращающий момент не должен превышать 0,8 для двигателей на 220 В и 0,64 для двигателей на 440 В.

Методические указания к заданию 1

К п.1. Структурная схема двигателя независимого возбуждения (точнее, электромеханического преобразователя с независимым возбуждением), соответствующая уравнениям, описывающим происходящие в нем процессы, и сами уравнения приведены в работах [1, 2, 3]. К параметрам, подлежащим определению, относятся: $L_{\epsilon}, T_{\epsilon}, R_{\Sigma}, L_{\Sigma}, T_{\Sigma}, \beta, \kappa \cdot \phi, M_H, E_H, \omega_H, R_H, \omega_0, J_H, \phi_H$.

Необходимо учесть, что в табл. 1 приведен номинальный ток двигателя, равный сумме номинальных токов якоря и возбуждения. Сопротивление якорной цепи приводится для двигателей типа Д к рабочей температуре $\theta_2 = 150^{\circ}\text{C}$, для двигателей типа П – к $\theta_2 = 90^{\circ}\text{C}$. Температуру окружающей среды θ_1 следует принять равной 20°C .

Коэффициент насыщения магнитной цепи при определении индуктивности L_{ϵ} обмотки возбуждения рекомендуется принять равным 1,5.

Таблица №2 Значения коэффициентов a и b

Номер варианта	a	a_1	a_2	a_3	b	b_1	b_2	b_3
0	0,3	1,5	0,6	0,75	1,0	0,6	0,5	-1,5
1	0	1,25	0,7	-0,3	1,5	1,6	0,6	0,7
2	0,5	1,5	0,8	0,4	1,5	1,5	0,8	-1,5
3	-1,0	1,7	0,85	-1,0	1,0	1,0	0,2	0,75
4	-0,5	1,6	0,75	-1,0	0,5	1,1	0,75	1,0
5	0	1,2	0,5	1,0	0,5	1,0	1,0	-1,0
6	0,5	1,45	0,3	1,0	0,5	1,2	1,0	-0,75
7	0	1,3	0,2	-0,3	1,0	1,3	1,0	1,0
8	-0,5	1,8	0,75	0,5	1,0	1,0	0,5	-0,5
9	0,3	1,4	0,4	0,2	0,3	0,9	0,8	-1,0

К п. 2, 3, 4, 5, 6, 7. Методика расчета естественной и искусственной характеристик, тормозных и регулировочных сопротивлений, скорости изложена в работах [1, 2, 3].

К п. 8. Расчет пусковых сопротивлений необходимо выполнить аналитически. Напряжение питания и магнитный поток при этом следует считать номинальными.

Контрольное задание 2

Для электропривода переменного тока с асинхронным двигателем с фазным ротором, тип и технические данные которого приведены в табл. 3, требуется:

1. Изобразить структурную схему для области рабочих скольжений и определить ее параметры.

2. Рассчитать и построить естественные статические электромеханическую $I_2 = f(s)$ и механическую $\omega = f(M)$ характеристики.

3. Рассчитать и построить реостатную характеристику двигателя, проходящую через точку с $\omega_u = a \cdot \omega_n$, $M = b \cdot M_n$, где a и b – коэффициенты, значения которых приведены в табл. 2. Определить величину сопротивления, которое должно быть введено в цепь ротора, для обеспечения работы двигателя в заданной точке.

4. Рассчитать и построить (на фоне естественной) искусственную механическую характеристику, соответствующую $u = a_2 \cdot u_n$ и $f = b \cdot f_{1n}$. Коэффициенты a_2 и b взять из табл. 2.

5. Рассчитать и построить с учетом насыщения механическую характеристику в режиме динамического торможения при $r_{2доб} = 0,5r_{2н}$ и постоянном токе возбуждения, величина которого указана в табл. 3 в долях от тока холостого хода.

6. Рассчитать пусковые характеристики и соответствующие им сопротивления при форсированном пуске в три ступени при $M_c = M_n$. Построить пусковую диаграмму. Проверить возможность пуска при $M_c = 0,8 \cdot M_n$; $M_c = M_n$; $M_c = 1,5 \cdot M_n$.

Таблица №3 Основные технические данные асинхронных двигателей

Параметры	Номер варианта									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Тип двигателя	МТН-111-6	МТН-211-6	МТН-312-6	МТН-411-8	МТН-412-6	МТН-611-6	МТН-312-8	МТН-412-8	МТН-512-8	МТН-612-10
Номинальная мощность P_n , кВт	3,0	7,0	15,0	18	30	75	11	22	37	60
Номинальное напряжение u_{1n} , В	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380
Номинальный ток статора I_{1n} , А	10,5	22,5	38,5	48	76	154	31	66	89	147
Номинальная скорость n_n , об/мин	895	920	950	695	965	950	700	715	705	565
Номинальная ЭДС ротора E_{2n} , В	176	236	219	221	255	270	165	248	305	248
Номинальный ток ротора I_{2n} , А	13,2	19,5	46	59	73	180	43	57	77	154
$\cos \varphi_n$	0,67	0,64	0,73	0,73	0,71	0,85	0,69	0,63	0,64	0,78
КПД η_n	0,65	0,73	0,81	0,84	0,845	0,87	0,78	0,805	0,85	0,85
Ток холостого хода I_0 , А	8,0	18,0	25,0	29,8	51,8	72,0	19,8	49,6	53,1	88,7
Максимальный момент на валу M_{\max} , Н·м	83	196	471	635	932	2610	422	883	1370	3140
$r_{1\text{действ}}$, Ом	2,25	0,835	0,337	0,35	0,133	0,049	0,51	0,202	0,103	0,06
$x_{1\text{действ}}$, Ом	2,45	0,88	0,431	0,51	0,197	0,133	0,666	0,313	0,172	0,136
$r_{2\text{действ}}$, Ом	0,775	0,446	0,125	0,13	0,059	0,028	0,132	0,102	0,091	0,046
$x_{2\text{действ}}$, Ом	0,829	0,666	0,254	0,25	0,173	0,096	0,29	0,231	0,356	0,133
σ_l	1,117	1,08	1,072	1,06	1,049	1,104	1,099	1,076	1,04	1,056
Коэффициент сопротивления K_r	3,92	2,18	2,66	2,66	1,96	1,83	3,5	2,03	1,42	2,1
Ток возбуждения в долях от I_0	2,0	2,7	2,8	2,0	1,9	2,2	2,7	1,8	1,9	2,0
Момент инерции ротора J , кг·м ²	0,195	0,46	1,25	2,15	2,7	2,5	1,55	3,0	5,7	5,25
$\cos \varphi_0$	0,125	0,112	0,092	0,08	0,071	0,052	0,103	0,084	0,08	0,06

Примечание: схема соединения обмоток статора и ротора – звезда. Активные сопротивления даны для нагретого двигателя. Номинальная частота сети – 50 Гц.

Методические указания к заданию 2

К п.1. Структурная схема асинхронного электромеханического преобразователя для области рабочих скольжений (линеаризованного в пределах рабочего участка статической механической характеристики) показана в работе [1]. К параметрам, которые нужно в первую очередь определить, относятся ω_0 , $S_{кр}$, R_l , R'_2 , X_l , X'_2 , X_K , $M_{кр}$, S_n , β , T_σ , где β - жесткость механической характеристики на линейном участке.

К п.2, 3. Естественная механическая характеристика рассчитывается по уточненной формуле Клосса. Методика расчета естественных характеристик $\omega = f(M)$ и $I'_2 = f(s)$ описана в работах [1, 2, 3].

Этой же литературой можно воспользоваться при расчете искусственной реостатной характеристики и величины добавочного сопротивления, которое следует ввести в цепь ротора для обеспечения работы двигателя в заданной точке.

К п.4. При расчете искусственной характеристики, соответствующей ненормальной частоте и напряжению, следует иметь в виду, что ω_0 , $S_{кр}$, X_K , $M_{кр}$ при этих условиях изменятся. Их нужно предварительно определить. Характеристика рассчитывается по формуле Клосса. При расчете задаются скольжением.

К п.5. Пример расчета механической характеристики для режима динамического торможения приводится в работе [1, § 3.14]. Однако в этом примере дается универсальная кривая намагничивания для двигателя другого типа. Ниже приводится универсальная кривая для двигателей МТН (рис. 1). Порядок расчета:

а) задается ток намагничивания в относительных единицах в пределах от 1 до 0, далее вычисляется значение тока намагничивания именованных единицах исходя из выражения:

$$I_\mu^* = \frac{I_\mu}{I_{\mu n}} \cong \frac{I_\mu}{I_0};$$

б) по универсальной кривой намагничивания (рис. 1) находится значение относительной ЭДС фазы статора и вычисляется величина $X_{\mu i}^*$ и $X_{\mu i}$:

$$X_{\mu n}^* = \frac{X_{\mu n}}{X_0} = \frac{E_{1\phi}}{E_{1n\phi}} \cdot \frac{I_0}{I_\mu} = \frac{E_1^*}{I_\mu^*} \text{ и } X_{\mu n} = X_{\mu n}^* \cdot X_0, \text{ где } X_0 = \frac{E_{1n\phi}}{I_0};$$

в) определяется эквивалентный переменный ток статора, соответствующий включению 2 фаз обмотки статора, соединенной в звезду, к источнику постоянного тока:

$$I_{\text{эв}} = \sqrt{\frac{2}{3}} I_{\text{пост}} = \sqrt{\frac{2}{3}} I_{\text{возб}};$$

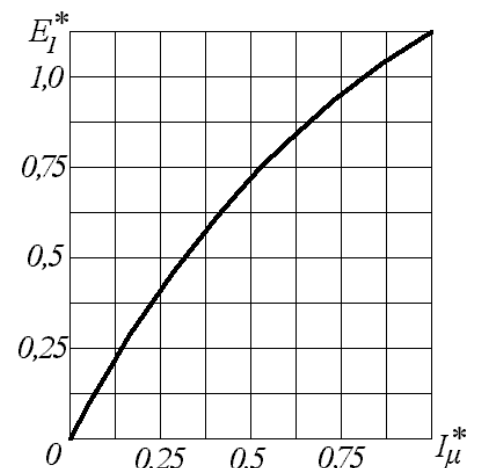


Рис.1. Универсальная кривая намагничивания

г) рассчитывается величина

$$\left(\frac{R'_2 + R'_{2доб}}{S}\right)^2 = \frac{(X_{\mu n} + X'_2)^2 - \left(\frac{I_{экв}}{I_0}\right)^2 \cdot X'^2_2}{\left(\frac{I_{экв}}{I_0}\right)^2 - 1};$$

д) находится ток ротора

$$I'_2 = \frac{I_{экв} \cdot X_{\mu n}}{\sqrt{\left(\frac{R'_2 + R'_{2доб}}{S}\right)^2 + (X_{\mu n} + X'_2)^2}};$$

е) определяется скорость двигателя

$$\omega = \omega_0 \cdot \frac{R'_2 + R'_{2доб}}{\left(\frac{R'_2 + R'_{2доб}}{S}\right)};$$

ж) рассчитывается электромагнитный момент двигателя

$$M = -\frac{3I'^2_2}{\omega_0} \cdot \left(\frac{R'_2 + R'_{2доб}}{S}\right).$$

К п.6. Расчет пусковой диаграммы и соответствующих ей сопротивлений выполняется графоаналитическим методом [1, 2, 3], изложенным далее. Характеристики считаются линейными.

При расчете пусковых сопротивлений в роторе АД, также как и для двигателей постоянного тока, вводится понятие форсированного и нормального пуска, понятие пуска по нормальной пусковой диаграмме, называемой также нормальной лучевой диаграммой, для которой максимальный пусковой момент $M_1 = const$ на всех ступенях пуска. Момент переключения M_2 также постоянен на всех ступенях. Однако для АД значение максимального пускового момента ограничено не условиями безыскровой коммутации, как для двигателей постоянного тока, а динамическими усилиями в обмотках ротора и большим нагревом при увеличении тока ротора в зоне критического скольжения.

Для АД при расчетах пусковых сопротивлений принимают: $M_1 < 0,85M_k$; $M_2 > (1,1-1,2)M_c$. На рис. 2 показано построение нормальной лучевой диаграммы для трехступенчатого пуска АД при точном методе расчета пусковых сопротивлений, учитывающем нелинейность естественной механической характеристики. Обозначения ступеней пусковых сопротивлений даны на рис. 2.

Задавшись, как указано выше, моментами M_1 и M_2 , находят на естественной характеристике точки **a** и **в** и проводят луч **ав** до пересечения его с горизонталью при $S=0$. Так находится точка Р – полюс нормальной пусковой диаграммы. Далее из точки **в** проводится горизонталь до пересечения с линией $M_2 = const$ (точка **в**₁), проводится второй луч (**рв**₁) до пересечения в точке **с** с линией $M_1 = const$. Таким же образом далее строится оставшаяся часть нормальной диаграммы **cc₁dd₁ie**. Все лучи этой диаграммы, называемой также лучевой диаграммой пересекаются в точке Р (полюсе) на линии **pf** при $S=0$.

Примечание: Для п. 2 все величины номинальные. Для п. 4 β , $T_{\text{э}}$, $M_{\text{кр}}$, ω_0 , $S_{\text{кр}}$, f_l необходимо пересчитать согласно заданным условиям.

Литература:

1. Ключев В. И., Теория электропривода. М.: Энергоатомиздат, 1985.
2. Вешеневский С.И., Характеристики электродвигателей в электроприводе. М.: Энергия, 1977
3. Чиликин М. Г., Сандлер А. С., Общий курс электропривода. М.: Энергоатомиздат, 1981.