

Департамент внутренней и кадровой политики Белгородской области

**Областное государственное автономное профессиональное образовательное учреждение
«Губкинский горно-политехнический колледж»**

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

**по выполнению самостоятельной работы
по МДК.01.01 Электрические машины и аппараты
для обучающихся по специальности 13.02.11**

**Техническая эксплуатация и обслуживание электрического и электромеханического
оборудования (по отраслям)**

Разработал: Канова Людмила Вячеславовна,
заведующий отделением, преподаватель

Губкин, 2018

Методические рекомендации разработаны в соответствии с Федеральным законом от 29.12.2012 №273 - ФЗ "Об образовании в Российской Федерации", ФГОС по специальности «Техническая эксплуатация и обслуживание электрического и электромеханического оборудования (по отраслям)», в которых определяется, что самостоятельная работа является одним из видов учебных занятий студентов (далее СРС).

Образовательное учреждение при формировании основной профессиональной образовательной программы «обязано обеспечить эффективную самостоятельную работу обучающихся в сочетании с совершенствованием управления ею со стороны преподавателей и мастеров производственного обучения» (п. 7.1. Федерального государственного образовательного стандарта среднего профессионального образования (далее – ФГОС СПО).

Самостоятельная работа студентов – одна из важных форм организации учебного процесса. Она играет особую роль в профессиональной подготовке специалистов, являясь формой, с одной стороны, организации самостоятельной работы студентов, с другой – развития их познавательной активности.

Цель самостоятельной работы – содействие оптимальному усвоению студентами учебного материала, готовности и потребности в самообразовании.

Задачи самостоятельной работы:

- углубление и систематизация знаний;
- постановка и решение познавательных задач;
- развитие аналитико - синтетических способностей умственной деятельности, умений работы с различной по объёму и виду информацией, учебной и научной литературой;
- практическое применение знаний, умений;
- развитие навыков организации самостоятельного учебного труда и контроля над его эффективностью.

При организации СРС преподаватели должны стремиться сформировать у студентов желание стать самостоятельными исследователями в овладении знаниями для своей будущей специальности. Выполнение заданий внеаудиторной самостоятельной работы позволит студентам развить и закрепить необходимые для этого качества. СРС является не просто важной формой образовательного процесса, а должна стать его основой.

Выполнение самостоятельной работы по МДК.01.01 Электрические машины и аппараты включает в себя выполнение расчетно-графических заданий (далее РГЗ) по изучаемым темам. Данные задания формируются на основании изученных тем по междисциплинарному курсу и выдаются студентам после проведения соответствующих практических занятий. Задания выполняются обучающимися в соответствии с вариантом, который включает в себя три цифры. Номер варианта определяется следующим образом:

первая цифра варианта определяется по первой букве фамилии

0	К, Ф
1	А, Л, Х
2	Б, М, Ц
3	В, Н, Ч
4	Г, О, Ш
5	Д, П, Щ
6	Е, Р, Э
7	Ж, С, Ю
8	З, Т, Я
9	И, У

две последние цифры варианта определяется по двум последним цифрам номера студента по поименной книге.

Задания должны быть выполнены в тетради для самостоятельной работы.

При выдачи задания преподаватель устанавливает срок сдачи без понижения оценки (1) и с понижением оценки (2).

Форма контроля и критерии оценки:

«Отлично» - задания выполнены верно, все действия записаны точно, указаны все единицы измерения величин, задание сдано в установленный срок (1).

«Хорошо» - задания выполнены верно, в действиях допущены неточности, указаны не все единицы измерения величин, задание сдано в установленный срок (1) или задания выполнены верно, все действия записаны точно, указаны все единицы измерения величин, задание сдано в установленный срок (2).

«Удовлетворительно» - задание выполнено с ошибками и сдано в установленные сроки (1 и 2) или задания выполнены верно, все действия записаны точно, указаны все единицы измерения величин, но сданы в более поздние сроки.

Тема 1.1. Машины постоянного тока

1. Расчет и построение обмоток машин постоянного тока

Чтобы правильно уложить секции в пазы сердечника якоря, соединить их между собой и с коллекторными пластинами необходимо знать шаги обмотки по поверхности якоря и по коллектору, измеряемые в числе элементарных пазов.

Различают следующие шаги обмоток:

1) y_1 – первый шаг. Равен ширине секции.

Этот шаг должен быть равен полюсному делению и обязательно целому числу. Но если Z_p не делится нацело на $2p$, то

$$y_1 = \frac{Z_p}{2p} \pm \varepsilon = \text{ц.ч. (целое число)}$$

2) y_2 – второй шаг. Равен расстоянию между второй активной стороной секции и первой стороной следующей по схеме обмотки секции.

3) y – результирующий шаг. Равен расстоянию между начальными сторонами двух секций, следующих по схеме друг за другом.

4) y_k – шаг по коллектору. Равен расстоянию между началом и концом секции по окружности коллектора (измеряется в числе коллекторных делений).

В зависимости от способа соединения секций между собой обмотки якорей подразделяются на петлевые и волновые.

При петлевой обмотке первый шаг делается по окружности якоря в одну сторону, а второй – в противоположную. Шаги петлевой обмотки связаны уравнением $y_1 + y_2 = y = y_k$. Направление слева направо считается положительным, поэтому y_2 является отрицательным числом.

Петлевые обмотки бывают простыми и сложными. В РГЗ выполняется расчет и построение простой петлевой обмотки. Если $y = y_k = \pm 1$, то такая обмотка называется простой.

Пример №1.

$$Z_p = S = K = 18, 2p = 2a = 4.$$

Для вычерчивания схемы определяем шаги обмотки:

$$y_1 = \frac{Z_p}{2p} \pm \varepsilon = \frac{18}{4} = 4\frac{1}{2} - \frac{1}{2} = 4; y = 1; y_2 = y - y_1 = 1 - 4 = -3.$$

На основании рассчитанных шагов строим таблицу соединения обмотки (рис.1)

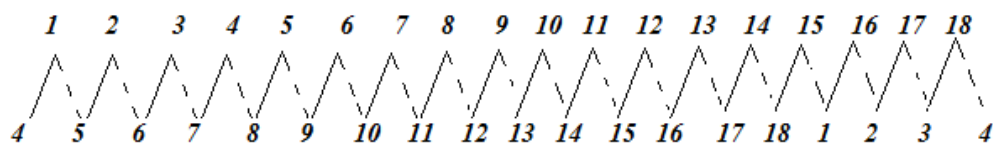


Рисунок 1. Таблица соединения обмотки.

Схема рассматриваемой обмотки изображена на рис. 2.

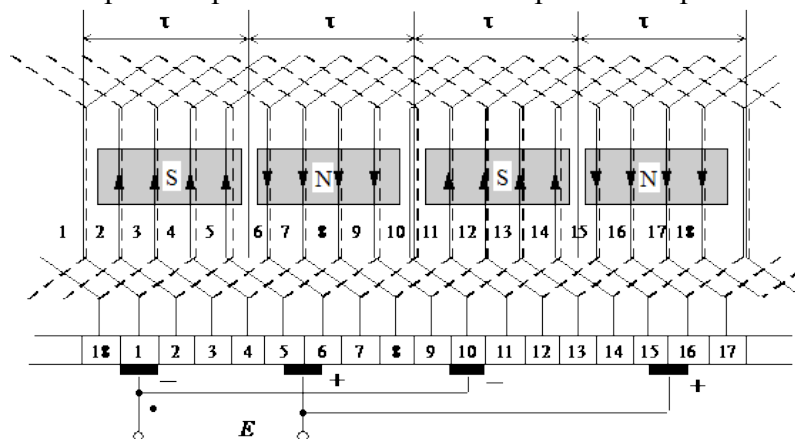


Рисунок 2. Схема простой петлевой обмотки

При вычерчивании схемы обмотки якоря обозначают одной и той же цифрой номер секции, номер паза, в котором укладывается верхний слой данной секции, и номер коллекторной пластины, к которой присоединяется начало секции. Щетки на коллекторе устанавливаются на геометрической нейтрали. Для ее нахождения на схеме обмоток изображают проекции основных полюсов. Задаваясь направлением вращения якоря определяют направление ЭДС в каждой секции.

Щетки, установленные на коллектор, делят обмотку на параллельные ветви. Из схемы следует, что рассматриваемая обмотка имеет 4 параллельные ветви. В общем случае простая петлевая обмотка имеет $2a = 2p$ параллельных ветвей.

В волновой обмотке второй шаг делается в ту же сторону, что и первый. Результирующий шаг должен быть больше или меньше двойного полюсного деления (2τ). Поэтому, делая один обход по окружности якоря, попадаем в паз, который находится вправо или влево от начала обхода на x пазов.

$$y = y_k = \frac{Z \pm x}{p}$$

При $x = \pm 1$ волновая обмотка называется простой.

Пример №2.

$2p = 4; Z_s = S = K = 13; 2a = 2.$

$$y = y_k = \frac{13-1}{2} = 6; y_1 = \frac{Z_s}{2p} \pm \varepsilon = \frac{13}{4} - \frac{1}{4} = 3; y_2 = y - y_1 = 6 - 3 = 3.$$

На основании рассчитанных шагов строим таблицу соединения обмотки (рис.3)

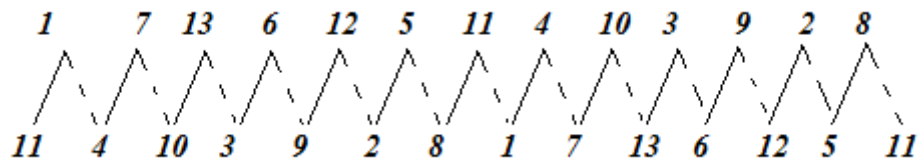


Рисунок 3. Таблица соединения обмотки.

Схема обмотки представлена на рис. 4.

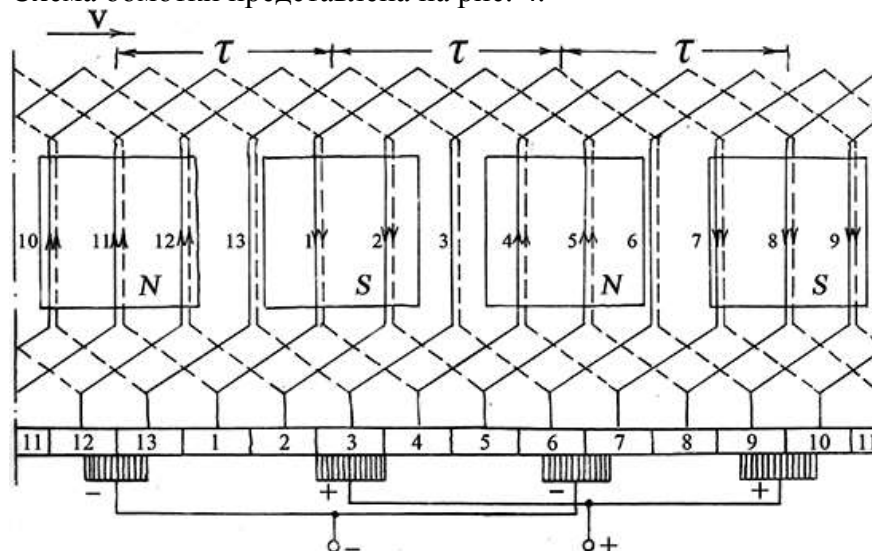


Рисунок 4. Схема простой волновой обмотки

Щетки на коллекторе, как и в петлевых обмотках, устанавливаются на геометрической нейтрали. Число параллельных ветвей в простой волновой обмотке $2a = 2$ и не зависит от числа полюсов.

В РГЗ необходимо выполнить расчет и построение схемы обмотки, предварительно определив ее тип.

Расчетно-графическое задание № 1.

Тема: «Расчет и построение обмоток машин постоянного тока»

Задание:

Для генератора постоянного тока

Требуется:

Составить таблицу обмотки якоря и начертить ее развернутую схему.

На схеме обозначить полюсы, расставить щетки и, задавшись направлением вращения якоря, определить полярность щеток. Определить шаги и максимальное число уравнильных соединений. Показать на схеме несколько уравнильных соединений (параметры для расчета см. в табл.1).

Таблица 1(по последней цифре варианта)

Наименование величин	варианты									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
2p	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
2a	2	2	2	2	2	4	4	4	4	4
Z	17	21	23	25	27	26	28	20	24	22

2. Расчет магнитной цепи машины постоянного тока

Одной из основных частей любой электрической машины является магнитная цепь. Она выполняется из ферромагнитных материалов (сталь, железо, чугун), поэтому практически весь магнитный поток замыкается по магнитной цепи. Расчет ее заключается в определении МДС (магнитодвижущей силы), необходимой для создания в воздушном зазоре машины магнитного потока, могущего навести в обмотке якоря заданную ЭДС.

Для упрощения расчета магнитную цепь разбивают на участки так, чтобы напряженность на каждом из них можно было бы считать постоянной. Тогда замкнутый контур заменяется суммой.

Выделяют следующие участки:

- воздушный зазор;
- зубцовый слой сердечника якоря;
- спинка сердечника якоря;
- сердечник основных полюсов;
- ярмо.

В этом случае МДС магнитной цепи будет равна

$$F_0 = F_\delta + F_z + F_a + F_m + F_y = w_\delta i_\delta$$

При нагрузке, когда в обмотке якоря имеется ток, результирующее магнитное поле возникает в результате наложения поля якоря на поле возбуждения. Влияние МДС якоря на поле основных полюсов называется реакцией якоря. Она является важным процессом, влияющим на рабочие свойства машины, и размагничивающее влияние реакции якоря по поперечной оси приходится учитывать. Обычно это делают посредством коэффициента реакции якоря $k_{р.я}$, который используют при расчете МДС, компенсирующей влияние реакции якоря по поперечной оси F_{qd} . Для определения $k_{р.я}$ пользуются графиком $k_{р.я} = f\left(\frac{F_a}{F_{B0}}\right)$ (рис.5), где нижняя граница графика соответствует магнитной индукции в зубцах якоря $B_z = 1,7$ Тл, а верхняя - $B_z = 2,3$ Тл.

Пример №3.

Двигатель постоянного тока параллельного возбуждения номинальной мощностью $P_{ном} = 100$ кВт включен в сеть напряжением $U_c = 440$ В; КПД двигателя $\eta_{ном} = 89\%$, обмотка якоря простая волновая с числом полюсов $2p=4$, число активных проводников в обмотке 280; ток в обмотке возбуждения $I_\delta = 0,02I_{ном}$, величина одностороннего воздушного зазора 2 мм, магнитная индукция в зазоре $B_\delta = 0,82$ Тл, магнитная индукция в зубцах якоря $B_z = 2,2$ Тл, коэффициент воздушного зазора $k_\delta = 1,3$, коэффициент магнитного насыщения магнитопровода двигателя $k_\mu = 1,35$.

Требуется определить МДС реакции якоря по поперечной оси F_{qd} и число витков в полюсной катушке возбуждения w_δ , необходимые для компенсации реакции якоря по поперечной оси при номинальной нагрузке двигателя.

Решение:

1. Ток, потребляемый двигателем в номинальном режиме

$$I_{ном} = \frac{P_{ном}}{U_c \cdot \eta_{ном}} = \frac{100 \cdot 10^3}{440 \cdot 0,89} = 255 \text{ А}$$

2. Ток в обмотке возбуждения

$$I_B = 0,02I_{\text{ном}} = 0,02 \cdot 255 = 5 \text{ A}$$

3. Ток в цепи якоря при номинальной нагрузке

$$I_{a\text{ном}} = I_{\text{ном}} - I_B = 255 - 5 = 250 \text{ A}$$

4. Магнитное напряжение воздушного зазора

$$F_\delta = 0,8 \cdot B_\delta \cdot \delta \cdot k_\delta \cdot 10^6 = 0,8 \cdot 0,82 \cdot 2 \cdot 10^{-3} \cdot 1,3 \cdot 10^6 = 1706 \text{ A}$$

5. МДС обмотки возбуждения в режиме холостого хода на пару полюсов

$$F_{B0} = 2 \cdot F_\delta \cdot k_\mu = 2 \cdot 1706 \cdot 1,35 = 4606 \text{ A}$$

6. МДС якоря на пару полюсов в режиме номинальной нагрузки

$$F_{a\text{ном}} = \frac{N \cdot I_{a\text{ном}}}{4 \cdot a \cdot p} = \frac{280 \cdot 250}{4 \cdot 1 \cdot 2} = 8750 \text{ A}$$

7. Коэффициент реакции якоря по поперечной оси (см.рис.3): при $B_z = 2,2 \text{ Тл}$ и $\frac{F_a}{F_{B0}} = \frac{8750}{4606} = 1,9$ коэффициент $k_{p.я} = 0,22$.

8. Приращение МДС возбуждения, компенсирующее влияние реакции якоря по поперечной оси

$$F_{qd} = k_{p.я} \cdot F_{a\text{ном}} = 0,22 \cdot 8750 = 1925 \text{ A}$$

9. МДС возбуждения на пару полюсов при номинальной нагрузке двигателя, достаточное для компенсации реакции якоря

$$F_{B.\text{ном}} = F_{B0} + F_{qd} = 4606 + 1925 = 6531 \text{ A}$$

10. Число витков в полюсной катушке обмотки возбуждения

$$w_B = \frac{F_{B.\text{ном}}}{2 \cdot I_B} = \frac{6531}{2 \cdot 5} = 653$$

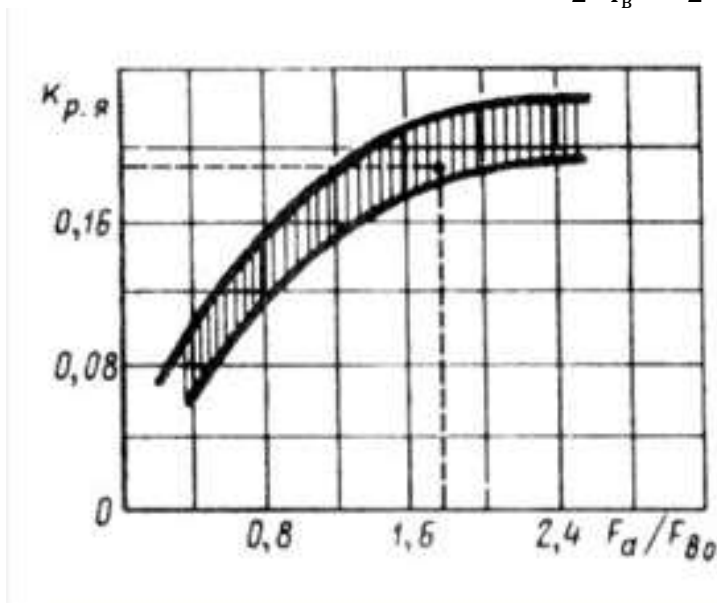


Рисунок 5. График $k_{p.я} = f\left(\frac{F_a}{F_{B0}}\right)$

Расчетно-графическое задание № 2.

Тема: «Расчет магнитной цепи машины постоянного тока»

Задание:

Двигатель постоянного тока параллельного возбуждения имеет параметры, указанные в таблице 2, а так же известно, что обмотка двигателя простая волновая, $2p=4$, $I_e=0,02I_{\text{ном}}$, $k_\delta=1,3$, $k_\mu=1,35$.

Требуется:

Определить МДС реакции якоря по поперечной оси F_{qd} и число витков в полюсной катушке возбуждения w_B , необходимые для компенсации реакции якоря по поперечной оси при номинальной нагрузке двигателя.

Таблица 2 (по последней цифре варианта)

Параметр	варианты									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$P_{ном}$, кВт	115	120	85	30	45	90	75	80	110	95
U_c , В	440	440	220	220	440	440	220	220	440	220
$\eta_{ном}$, %	87	90	87	85	85	87	86	88	91	84
N	270	300	150	120	260	240	120	160	280	170
δ , мм	2	2	1,8	1,8	1,6	1,8	1,6	1,7	2	1,8
B_z , Тл	2,1	2,3	1,8	1,9	1,7	1,9	2	1,8	2,2	1,8
B_δ , Тл	0,82	0,85	0,8	0,83	0,8	0,83	0,82	0,81	0,84	0,81

3. Расчет параметров генератора постоянного тока

Генератор преобразует механическую энергию, подводимую к нему, в электрическую.

ЭДС обмотки якоря E_a пропорциональна основному магнитному потоку Φ и частоте вращения

$$E_a = c_E \cdot \Phi \cdot n$$

где $c_E = \frac{p \cdot N}{60 \cdot a}$ – коэффициент, определяемый конструкцией обмотки якоря: числом пар полюсов p , количеством пазовых сторон (проводников) N , составляющих обмотку, и числом параллельных ветвей a .

Электромагнитный момент M , возникающий на якоре при прохождении тока I_a по обмотке якоря

$$M = c_M \cdot \Phi \cdot I_a$$

где $c_M = \frac{p \cdot N}{2\pi \cdot a}$ – коэффициент, определяемый конструкцией обмотки якоря.

Так же электромагнитный момент машины постоянного тока прямо пропорционален электромагнитной мощности $P_{эм} = E_a \cdot I_a$ и обратно пропорционален частоте вращения якоря n

$$M = 9,55 \cdot \frac{P_{эм}}{n}$$

Уравнение напряжений U на зажимах генератора имеет вид

$$U = E_a - I_a \cdot r_a - \Delta U_{щ} = E_a - I_a \cdot \Sigma r$$

где Σr – суммарное сопротивление в цепи обмотки якоря; $\Delta U_{щ}$ – падение напряжения в щеточном контакте на пару щеток, зависит от марки применяемых в машине щеток.

При оценке свойств генератора постоянного тока используют понятие номинального изменения напряжения на выходе генератора при сбросе нагрузки

$$\Delta U_{ном} = \frac{U_0 - U_{ном}}{U_{ном}} \cdot 100\%$$

где U_0 – напряжение на выходе генератора в режиме холостого хода.

Величина $\Delta U_{ном}$ зависит от способа возбуждения генератора. Например, для генератора независимого возбуждения она составляет 5 – 10%.

Пример №4.

Генератор постоянного тока параллельного возбуждения имеет номинальные данные: мощность $P_{ном} = 10$ кВт, напряжение $U_{ном} = 230$ В, частота вращения $n_{ном} = 1450$ об/мин, сопротивление обмоток якоря, приведенное к рабочей температуре, $r_a = 0,3$ Ом, падение напряжения в щеточном контакте $\Delta U_{щ} = 2$ В, сопротивление цепи обмотки возбуждения $r_g = 150$ Ом, КПД в номинальном режиме $\eta_{ном} = 86,5\%$.

Требуется определить ток генератора $I_{ном}$, ток в цепи возбуждения i_g , ток в цепи якоря $I_{аном}$, ЭДС якоря E_a , электромагнитную мощность $P_{эм,ном}$, электромагнитный момент при номинальной нагрузке $M_{ном}$, мощность приводного двигателя $P_{Iном}$.

Решение:

1. Номинальный ток на выходе генератора

$$I_{\text{ном}} = \frac{P_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}} = \frac{10000}{230} = 43,5 \text{ A}$$

2. Ток в обмотке возбуждения

$$i_{\text{в}} = \frac{U_{\text{ном}}}{r_{\text{в}}} = \frac{230}{150} = 1,5 \text{ A}$$

3. Ток в цепи якоря при номинальной нагрузке

$$I_{\text{аном}} = I_{\text{ном}} + i_{\text{в}} = 43,5 + 1,5 = 45 \text{ A}$$

4. ЭДС в обмотке якоря в номинальном режиме

$$E_{\text{аном}} = U_{\text{ном}} + I_{\text{аном}} \cdot r_{\text{а}} + \Delta U_{\text{щ}} = 230 + 45 \cdot 0,3 + 2 = 245,5 \text{ В}$$

5. Электромагнитная мощность генератора при номинальной нагрузке

$$P_{\text{эм.ном}} = E_{\text{а}} \cdot I_{\text{аном}} = 245,5 \cdot 45 = 11047,5 \text{ Вт}$$

6. Электромагнитный момент генератора в режиме номинальной нагрузки

$$M_{\text{ном}} = 9,55 \cdot \frac{P_{\text{эм.ном}}}{n_{\text{ном}}} = 9,55 \cdot \frac{11047,5}{1450} = 73 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

7. Мощность приводного двигателя

$$P_{1\text{ном}} = \frac{P_{\text{ном}}}{\eta_{\text{ном}}} = \frac{10000}{0,865} = 11560 \text{ Вт}$$

Расчетно-графическое задание № 3.

Тема: «Расчет параметров генератора постоянного тока»

Задание:

Генератор постоянного тока параллельного возбуждения имеет параметры, указанные в таблице 3, а так же известно, что $\Delta U_{\text{щ}} = 2 \text{ В}$.

Требуется:

Определить значения параметров, не указанных в таблице 3.

Таблица 3 (по последней цифре варианта)

Параметр	варианты									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$P_{\text{ном}}, \text{ кВт}$	8	?	?	17	45	12	?	?	20	40
$U_{\text{ном}}, \text{ В}$	230	230	460	230	?	230	230	460	230	?
$n_{\text{ном}}, \text{ об/мин}$	1400	?	?	1500	1000	1200	?	?	1600	1150
$r_{\text{а}}, \text{ Ом}$	0,33	0,15	?	?	?	0,25	0,2	?	?	?
$r_{\text{в}}, \text{ Ом}$	145	100	?	?	92	120	110	?	?	96
$\eta_{\text{ном}}, \%$	86	?	88	?	88	87	?	90	?	89
$I_{\text{ном}}, \text{ А}$	?	87	?	?	97,8	?	90	?	?	98
$i_{\text{в}}, \text{ А}$	?	?	4	?	?	?	?	6	?	?
$I_{\text{аном}}, \text{ А}$	?	?	?	75	?	?	?	?	70	?
$E_{\text{а}}, \text{ В}$	?	?	480	240	477	?	?	490	244	480
$P_{\text{эм.ном}}, \text{ кВт}$	?	?	55	?	?	?	?	58	?	?
$M_{\text{ном}}, \text{ Н} \cdot \text{м}$	?	280	525	?	?	?	250	520	?	?
$P_{1\text{ном}}, \text{ кВт}$	?	23	?	21	?	?	24	?	25	?

4. Расчет параметров двигателя постоянного тока

Двигатель преобразует электрическую энергию в механическую.

Уравнение напряжений U на зажимах двигателя имеет вид

$$U = E_{\text{а}} + I_{\text{а}} \cdot \Sigma r + \Delta U_{\text{щ}}$$

т.е. ЭДС $E_{\text{а}}$, индуцируемая в обмотке якоря, меньше подводимого напряжения на величину внутреннего падения напряжения в цепи якоря. Отсюда ток якоря

$$I_{\text{а}} = \frac{U - E_{\text{а}}}{\Sigma r}$$

Электромагнитный момент двигателя постоянного тока

$$M = c_M \cdot \Phi \cdot I_a = 9,55 \frac{P_{\text{эм}}}{n}$$

Момент на валу двигателя (полезный момент)

$$M_2 = M - M_0 = 9,55 \frac{P_2}{n}$$

где M_0 – момент холостого хода; P_2 – полезная мощность двигателя.

Частота вращения якоря двигателя постоянного тока, об/мин,

$$n = \frac{U - I_a \cdot \Sigma r}{c_E \cdot \Phi}$$

Пример №5.

Двигатель постоянного тока параллельного возбуждения имеет следующие данные: номинальная мощность $P_{\text{ном}} = 25$ кВт, напряжение питания $U_{\text{ном}} = 440$ В, номинальная частота вращения $n_{\text{ном}} = 1500$ об/мин, сопротивление обмоток в цепи якоря $r_a = 0,15$ Ом, сопротивление цепи обмотки возбуждения $r_e = 88$ Ом, падение напряжения в щеточном контакте $\Delta U_{\text{щ}} = 2$ В, КПД в номинальном режиме $\eta_{\text{ном}} = 85\%$.

Требуется определить потребляемый двигателем ток в режиме номинальной нагрузки $I_{\text{ном}}$, частоту вращения n_0 и ток I_0 в режиме холостого хода, номинальные изменения частоты вращения якоря двигателя при сбросе нагрузки Δn . Влиянием реакции якоря пренебречь.

Решение:

1. Потребляемая двигателем мощность при номинальной нагрузке

$$P_{1\text{ном}} = \frac{P_{\text{ном}}}{\eta_{\text{ном}}} = \frac{25 \cdot 10^3}{0,85} = 29412 \text{ Вт}$$

2. Ток, потребляемый двигателем в режиме номинальной нагрузки

$$I_{\text{ном}} = \frac{P_{1\text{ном}}}{U_{\text{ном}}} = \frac{29412}{440} = 67 \text{ А}$$

3. Ток в цепи обмотки возбуждения

$$I_B = \frac{U_{\text{ном}}}{r_B} = \frac{440}{88} = 5 \text{ А}$$

4. Ток в обмотке якоря

$$I_{a\text{ном}} = I_{\text{ном}} - I_B = 67 - 5 = 62 \text{ А}$$

5. ЭДС обмотки якоря в режиме номинальной нагрузки

$$E_{a\text{ном}} = U_{\text{ном}} - I_{a\text{ном}} \cdot r_a - \Delta U_{\text{щ}} = 440 - 62 \cdot 0,15 - 2 = 428,7 \text{ В}$$

6. Коэффициенты:

так как $E_a = c_E \cdot \Phi \cdot n$, то

$$c_E \cdot \Phi = \frac{E_{a\text{ном}}}{n_{\text{ном}}} = \frac{428,7}{1500} = 0,286$$

Отношения коэффициентов $\frac{c_M}{c_E} = \frac{60}{2 \cdot \pi} = 9,55$, следовательно

$$c_M \cdot \Phi = 9,55 \cdot c_E \cdot \Phi = 9,55 \cdot 0,286 = 2,73$$

7. Момент на валу двигателя при номинальной нагрузке

$$M_{2\text{ном}} = 9,55 \cdot \frac{P_{\text{ном}}}{n_{\text{ном}}} = 9,55 \cdot \frac{25 \cdot 10^3}{1500} = 159 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

8. Электромагнитная мощность при номинальной нагрузке

$$P_{\text{эм}} = E_{a\text{ном}} \cdot I_{a\text{ном}} = 428,7 \cdot 62 = 26579 \text{ Вт}$$

9. Электромагнитный момент при номинальной нагрузке

$$M_{\text{ном}} = 9,55 \cdot \frac{P_{\text{эм}}}{n_{\text{ном}}} = 9,55 \cdot \frac{26579}{1500} = 169 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

10. Момент холостого хода

$$M_0 = M_{\text{ном}} - M_{2\text{ном}} = 169 - 159 = 10 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

11. Ток в режиме холостого хода

$$I_{a0} = \frac{M_0}{c_M \cdot \Phi} = \frac{10}{2,73} = 3,66 \text{ А}$$

12. ЭДС в режиме холостого хода (принимая $\Delta U_{щ}=0$)

$$E_{a0} = U_{\text{ном}} - I_{a\text{ном}} \cdot r_a = 440 - 3,66 \cdot 0,15 = 439,5 \text{ В}$$

13. Частота вращения якоря в режиме холостого хода

$$n_0 = \frac{E_{a0}}{c_E \cdot \Phi} = \frac{439,5}{0,286} = 1537 \text{ об/мин}$$

14. Номинальное изменение частоты вращения двигателя при сбросе нагрузки

$$\Delta n_{\text{ном}} = \frac{n_0 - n_{\text{ном}}}{n_{\text{ном}}} \cdot 100 = \frac{1537 - 1500}{1500} \cdot 100 = 2,47\%$$

Расчетно-графическое задание № 4.

Тема: «Расчет параметров двигателя постоянного тока»

Задание:

Двигатель постоянного тока параллельного возбуждения имеет параметры, указанные в таблице 4. Так же известно, что падение напряжения в щеточном контакте $\Delta U_{щ}=2 \text{ В}$.

Требуется:

Определить потребляемый двигателем ток в режиме номинальной нагрузки $I_{\text{ном}}$, частоту вращения n_0 и ток I_0 в режиме холостого хода, номинальные изменения частоты вращения якоря двигателя при сбросе нагрузки Δn . Влиянием реакции якоря пренебречь.

Таблица 4 (по последней цифре варианта)

Параметр	варианты									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$P_{\text{ном}}, \text{ кВт}$	15	45	4,2	18	22	14	40	6	20	32
$U_{\text{ном}}, \text{ В}$	220	440	220	220	440	220	440	220	220	440
$n_{\text{ном}}, \text{ об/мин}$	1000	1500	1500	1200	1400	1600	1350	1750	1150	1050
$r_a, \text{ Ом}$	0,12	0,13	0,15	0,12	0,14	0,16	0,11	0,1	0,13	0,17
$r_{\phi}, \text{ Ом}$	73	88	64	73	85	76	82	66	77	86
$\eta_{\text{ном}}, \%$	83,8	88	78	84	86	82	87,5	77	83	89

5. Рабочие характеристики двигателя постоянного тока

Рабочими характеристиками называются зависимости: n , I_a , M , P_1 и $\eta(P_2)$ при $U=U_n=\text{const}$, $i_b = \text{const}$.

Пример №6.

Двигатель постоянного тока параллельного возбуждения работает от сети напряжением $U_c = 220 \text{ В}$. Технические данные двигателя: номинальный ток нагрузки $I_{\text{ном}}=65 \text{ А}$, номинальная частота вращения $n_{\text{ном}}=770 \text{ об/мин}$, ток холостого хода $I_0=6,5 \text{ А}$, сопротивление цепи якоря, приведенное к рабочей температуре, $\Sigma r=0,28 \text{ Ом}$, ток возбуждения $i_b=1,6 \text{ А}$. В двигателе используются угольно-графитные щетки с переходным падением напряжения на пару щеток $\Delta U_{щ} = 2 \text{ В}$.

Требуется рассчитать данные и построить графики зависимости КПД η , частоты вращения n , момента на валу M_2 от мощности на валу двигателя P_2 .

Влиянием реакции якоря пренебречь и считать $\Phi=\text{const}$.

Решение:

1. Потери и КПД двигателя:

Постоянные потери двигателя включают магнитные p_c , механические $p_{\text{мех}}$ потери и потери на возбуждение p_b , т.е. $p_{\text{пост}} = p_c + p_{\text{мех}} + p_b$.

$$p_b = U_c \cdot i_b = 220 \cdot 1,6 = 352 \text{ Вт}$$

При работе двигателя в режиме холостого хода двигатель потребляет из сети мощность $P_{10} = I_0 \cdot U_c$, которая включает помимо постоянных потерь $p_{\text{пост}}$ еще и переменные потери $p_{\text{пер}}$, которые включают:

- электрические потери в цепи якоря $p_{\text{эа0}} = I_{\text{а0}}^2 \cdot \Sigma r$
- потери в щеточном контакте $p_{\text{щ0}} = I_{\text{а0}} \cdot \Delta U_{\text{щ}}$
- добавочные потери $p_{\text{доб}} = 0,01 \cdot P_{10} = 0,01 \cdot I_0 \cdot U_c$

Таким образом, постоянные потери двигателя равны

$$p_{\text{пост}} = P_{10} - p_{\text{эа0}} - p_{\text{щ0}} - p_{\text{доб}}$$

Ток якоря в режиме холостого хода

$$I_{\text{а0}} = I_0 - i_{\text{в}} = 6,5 - 1,6 = 4,9 \text{ А}$$

$$P_{10} = I_0 \cdot U_c = 6,5 \cdot 220 = 1430 \text{ Вт}$$

$$p_{\text{эа0}} = I_{\text{а0}}^2 \cdot \Sigma r = 4,9^2 \cdot 0,28 = 6,7 \text{ Вт}$$

$$p_{\text{щ0}} = I_{\text{а0}} \cdot \Delta U_{\text{щ}} = 4,9 \cdot 2 = 9,8 \text{ Вт}$$

$$p_{\text{доб}} = 0,01 \cdot I_0 \cdot U_c = 0,01 \cdot 6,5 \cdot 220 = 14,3 \text{ Вт}$$

$$p_{\text{пост}} = P_{10} - p_{\text{эа0}} - p_{\text{щ0}} - p_{\text{доб}} = 1430 - 6,7 - 9,8 - 14,3 = 1399 \text{ Вт}$$

2. Коэффициент $c_E \cdot \Phi$:

Ток в цепи якоря в режиме номинальной нагрузки

$$I_{\text{аном}} = I_{\text{ном}} - i_{\text{в}} = 65 - 1,6 = 63,4 \text{ А}$$

определим, используя параметры номинального режима нагрузки двигателя

$$c_E \cdot \Phi = \frac{U_c - I_{\text{аном}} \cdot \Sigma r}{n_{\text{ном}}} = \frac{220 - 63,4 \cdot 0,28}{770} = 0,263$$

3. Чтобы получить данные, необходимые для построения характеристик, зададимся рядом значений коэффициента нагрузки $\beta = \frac{I_a}{I_{\text{аном}}}$, и для каждого выполним расчет.

Минимальное значение коэффициента нагрузки соответствует режиму холостого хода $\beta = \frac{I_{\text{а0}}}{I_{\text{аном}}} = \frac{4,9}{63,4} = 0,08$. Принимаем следующие значения коэффициента нагрузки: $\beta = 0,08; 0,25; 0,5; 0,75; 1,0; 1,2$.

Результаты расчетов сведены в таблицу 5.

Таблица 5.

параметр	значения параметра					
$\beta = I_a / I_{\text{аном}}$	0,08	0,25	0,5	0,75	1	1,2
$I_a = I_{\text{аном}} \cdot \beta, \text{ А}$	4,9	15,85	31,7	47,55	63,4	76,1
$I = I_a + i_{\text{в}}, \text{ А}$	6,5	17,45	33,3	49,15	65	77,7
$P_1 = I \cdot U_c, \text{ Вт}$	1430	3839	7326	10813	14300	17094
$P_{\text{пост}}, \text{ Вт}$	1399	1399	1399	1399	1399	1399
$p_{\text{эа}} = I_a^2 \cdot \Sigma r, \text{ Вт}$	6,7	70,3	281,4	633,1	1125	1621
$p_{\text{доб}} = 0,01 \cdot P_1, \text{ Вт}$	14,3	38,4	73,3	108,1	143	170,9
$p_{\text{щ}} = I_a \cdot \Delta U_{\text{щ}}, \text{ Вт}$	9,8	31,7	63,4	95,1	126,8	152,2
$p_{\text{пер}} = p_{\text{эа}} + p_{\text{щ}} + p_{\text{доб}}, \text{ Вт}$	30,8	140,4	418,1	836,3	1395	1945
$\Sigma p = p_{\text{пост}} + p_{\text{пер}}, \text{ Вт}$	1430	1539	1817	2235	2794	3344
$P_2 = P_1 - \Sigma p, \text{ Вт}$	0	2300	5509	8578	11506	13750
$\eta = (P_2 / P_1) \cdot 100$	0	59,9	75,2	79,3	80,5	80,4
$I_a \cdot \Sigma r, \text{ В}$	1,4	4,4	8,9	13,3	17,8	21,3
$E_a = U_c - I_a \cdot \Sigma r, \text{ В}$	218,6	215,6	211,1	206,7	202,2	198,7
$n = E_a / c_E \cdot \Phi, \text{ об/мин}$	831	820	803	786	769	756
$M_2 = 9,55 \cdot P_2 / n, \text{ Н·м}$	0	26,8	65,5	104	143	174

По данным таблицы 5 построены графики зависимости n, M_2 и $\eta(P_2)$ (рис.5)

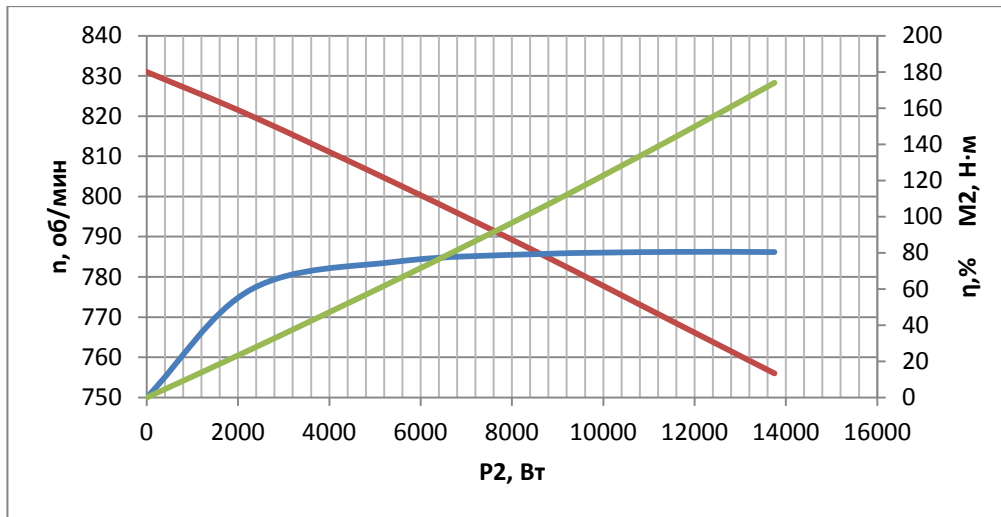


Рисунок 5. Графики зависимости n , M_2 и $\eta(P_2)$

Расчетно-графическое задание №5.

Тема: «Рабочие характеристики двигателя постоянного тока».

Задание:

Двигатель постоянного тока параллельного возбуждения работает от сети напряжением $U_c = 220\text{В}$. Технические данные двигателя приведены в таблице 6. В двигателе используются угольно-графитные щетки с переходным падением напряжения на пару щеток $\Delta U_{щ} = 2\text{В}$.

Требуется:

Рассчитать данные и построить графики зависимости КПД η , частоты вращения n , момента на валу M_2 от мощности на валу двигателя P_2 .

Влиянием реакции якоря пренебречь и считать $\Phi = \text{const}$.

Таблица 6 (по последней цифре варианта).

параметр	варианты									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$I_n, \text{А}$	86	116	192	44	33	90	118	196	48	38
$n_n, \text{об/мин}$	690	650	575	840	1100	720	670	580	850	1150
$I_0, \text{А}$	9	9,8	13,4	6,6	5,8	8,6	9,6	12,8	6,4	6
$\Sigma r, \text{Ом}$	0,17	0,11	0,055	0,42	0,57	0,2	0,13	0,06	0,4	0,55
$i_a, \text{А}$	2,2	2,7	4	1,5	1,18	2,4	2,8	4,2	1,6	1,22

6. Механические характеристики двигателя постоянного тока

При эксплуатации двигателей постоянного тока чаще пользуются механическими характеристиками, которые представляют зависимости его скорости от вращающего момента $n(M)$.

Почти все электродвигатели обладают тем свойством, что их скорость является убывающей функцией момента. Но степень изменения скорости с изменением момента у разных двигателей различна и характеризуется жесткостью механической характеристики.

Двигатели параллельного и независимого возбуждения: механическими характеристиками такого двигателя называются зависимости $n(M)$ при $U = \text{const}$; $i_a = \text{const}$; $\Sigma r_a = \Sigma r + r_d = \text{const}$.

Уравнение механической характеристики:

$$n = \frac{U}{c_E \Phi} - \frac{\Sigma r + r_d}{c_E c_M \Phi^2} \cdot M = n_0 - cM$$

где $n_0 = \frac{U}{c_E \Phi}$ - частота вращения при холостом ходе;

$c = \frac{\Sigma r + r_d}{c_E c_M \Phi^2} = \text{const}$, если допустить, что $\Phi = \text{const}$.

Механические характеристики двигателей параллельного и независимого возбуждения представляют собой линейные зависимости. При $r_d=0$ характеристика называется естественной.

Естественной характеристикой называется такая характеристика двигателя, которая получена при отсутствии внешних резисторов в якорной цепи и номинальных значениях напряжения и магнитного потока двигателя. Если в цепь якоря двигателя включен добавочный резистор, то механическая характеристика называется искусственной (реостатной). Так же искусственной будет называться характеристика, которая получена при изменении параметров двигателя (напряжения или магнитного потока).

Естественная характеристика двигателей независимого и параллельного возбуждения является жесткой, так как при росте нагрузки снижение скорости незначительно. С ростом r_d увеличивается c и наклон характеристики, следовательно жесткость механической характеристики снижается.

Двигатели последовательного возбуждения: В отличие от ДПТ НВ здесь магнитный поток является функцией тока якоря. Механическая характеристика ДПТ ПВ мягкая.

При $r_d=0$ механическая характеристика называется естественной. При $r_d>0$ крутизна механической характеристики возрастает.

Механические характеристики ДПТ ПВ не могут быть рассчитаны аналитически, поэтому на практике пользуются заводскими характеристиками, снятыми экспериментально. Их называют универсальными характеристиками и представляют в каталоге в относительных единицах (о.е.) обычно для всей серии двигателей (рис.6).

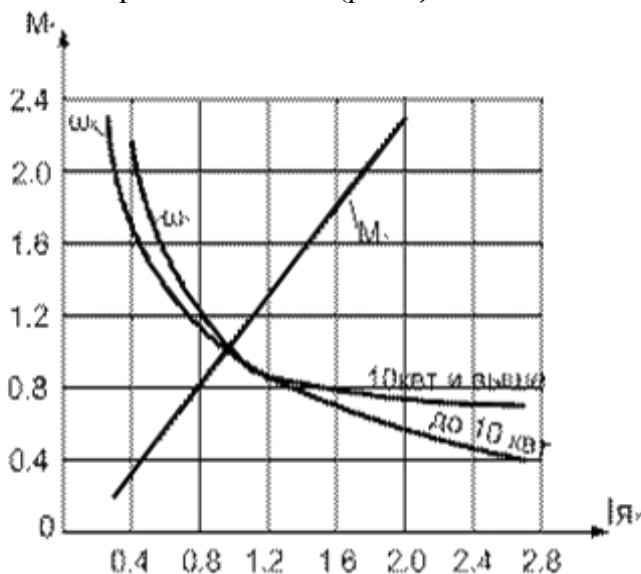


Рисунок 6. Универсальные естественные характеристики ДПТ ПВ серий МП, ДП и Д

Пример №7.

Двигатель постоянного тока независимого возбуждения имеет следующие параметры: номинальная мощность $P_{ном} = 14$ кВт, напряжение питания $U_{ном} = 220$ В, номинальная частота вращения $n_{ном} = 1000$ об/мин, номинальный ток нагрузки $I_{ном} = 76$ А.

Требуется: 1) рассчитать и построить естественную характеристику двигателя; 2) рассчитать и построить искусственную характеристику при введении добавочного сопротивления $r_d=0,77$ Ом; 3) рассчитать и построить искусственную характеристику при снижении напряжения на 25%.

Решение:

1) КПД двигателя в режиме номинальной нагрузки

$$\eta_{ном} = \frac{P_{ном}}{U_{ном} \cdot I_{ном}} = \frac{14 \cdot 10^3}{220 \cdot 76} = 0,84$$

2) Сопротивление в цепи якоря определяем, принимая, что половина всех потерь в двигателе при номинальной нагрузке связана с потерями в обмотке якоря

$$\Sigma r = 0,5 \cdot \frac{U_{\text{ном}}}{I_{\text{ном}}} \cdot (1 - \eta_{\text{ном}}) = 0,5 \cdot \frac{220}{76} \cdot (1 - 0,84) = 0,23 \text{ Ом}$$

3) Коэффициенты:

$$c_E \cdot \Phi = \frac{U_{\text{ном}} - I_{\text{аном}} \cdot \Sigma r}{n_{\text{ном}}} = \frac{220 - 76 \cdot 0,23}{1000} = 0,203$$

$$c_M \cdot \Phi = 9,55 \cdot c_E \cdot \Phi = 9,55 \cdot 0,203 = 1,94$$

4) Скорость идеального холостого хода

$$n_0 = \frac{U_{\text{ном}}}{c_E \cdot \Phi} = \frac{220}{0,203} = 1084 \text{ об/мин}$$

5) Момент на валу двигателя при номинальной нагрузке

$$M_{\text{ном}} = c_M \cdot \Phi \cdot I_{\text{ном}} = 1,94 \cdot 76 = 147 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

6) Естественная характеристика двигателя проходит через точки с координатами (0; 1084) – (147; 1000) (рис.7, линия 1)

7) Скорость двигателя при введении в цепь якоря добавочного сопротивления в номинальном режиме

$$n_{и1} = n_{\text{ном}} \cdot \left[1 - \frac{I_{\text{ном}}(\Sigma r + r_d)}{U_{\text{ном}}} \right] = 1000 \cdot \left[1 - \frac{76(0,23 + 0,77)}{220} \right] = 655 \text{ об/мин}$$

8) Искусственная характеристика двигателя проходит через точки с координатами (0; 1084) – (147; 655) (рис.7, линия 2)

9) Величина напряжения, приложенного к двигателю при снижении его на 25%

$$U_{и} = 0,75 \cdot U_{\text{ном}} = 0,75 \cdot 220 = 165 \text{ В}$$

10) Скорость идеального холостого хода при снижении напряжения

$$n_{0и} = \frac{U_{и}}{c_E \cdot \Phi} = \frac{165}{0,203} = 813 \text{ об/мин}$$

11) Скорость двигателя в номинальном режиме при снижении напряжения

$$n_{и2} = n_{0и} - \frac{M_{\text{ном}} \cdot \Sigma r}{c_E \cdot \Phi \cdot c_M \cdot \Phi} = 813 - \frac{147 \cdot 0,23}{0,203 \cdot 1,94} = 727 \text{ об/мин}$$

12) Искусственная характеристика двигателя проходит через точки с координатами (0; 813) – (147; 727) (рис.7, линия 3)

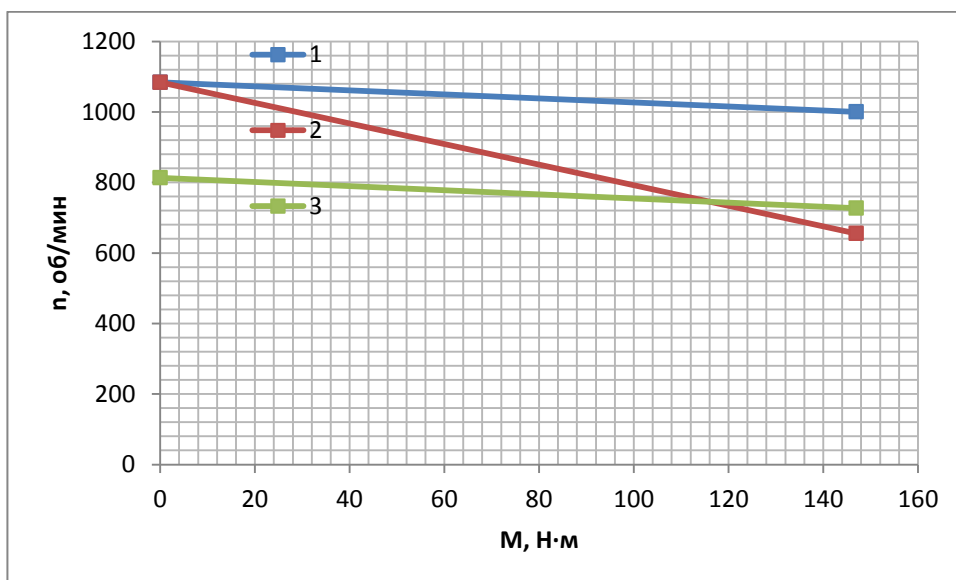


Рисунок 7. Механические характеристики ДПТ НВ

Пример №10.

Двигатель постоянного тока последовательного возбуждения имеет следующие параметры: номинальная мощность $P_{ном} = 16$ кВт, напряжение питания $U_{ном} = 220$ В, номинальная частота вращения $n_{ном} = 600$ об/мин, номинальный ток нагрузки $I_{ном} = 86$ А.

Требуется: 1) рассчитать и построить естественную характеристику двигателя; 2) рассчитать и построить искусственную характеристику при введении добавочного сопротивления $r_d = 1,7$ Ом; 3) рассчитать и построить искусственную характеристику при снижении напряжения на 35%.

Решение:

- 1) Момент на валу двигателя при номинальной нагрузке

$$M_{ном} = 9,55 \cdot \frac{P_{ном}}{n_{ном}} = 9,55 \cdot \frac{16 \cdot 10^3}{600} = 255 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

- 2) КПД двигателя в режиме номинальной нагрузки

$$\eta_{ном} = \frac{P_{ном}}{U_{ном} \cdot I_{ном}} = \frac{16 \cdot 10^3}{220 \cdot 86} = 0,85$$

- 3) Сопротивление двигателя

$$r_{дв} = \Sigma r + r_v = \Sigma r + 0,5 \cdot \Sigma r = 0,75 \cdot \frac{U_{ном}}{I_{ном}} \cdot (1 - \eta_{ном}) = 0,75 \cdot \frac{220}{86} \cdot (1 - 0,85) = 0,3 \text{ Ом}$$

- 4) Используя кривые универсальных характеристик в о.е. (рис.4), рассчитываем характеристики в абсолютных единицах. Расчеты сводим в таблицу 7. На основании расчетов строим естественную характеристику (рис.8, линия 1).

- 5) Для расчета реостатной характеристики

$$n_{и1} = n_e \cdot \frac{U_{ном} - I \cdot (r_{дв} + r_d)}{U_{ном} - I \cdot r_{дв}} = n_e \cdot \frac{220 - I \cdot (0,3 + 1,7)}{220 - I \cdot 0,3} = n_e \cdot \frac{220 - 2 \cdot I}{220 - 0,3 \cdot I}$$

Результаты расчетов заносим в таблицу 8. На основании расчетов строим искусственную характеристику (рис.8, линия 2).

- 6) При снижении напряжения на 35%

$$n_{и2} = \frac{U}{U_{ном}} \cdot n_e = \frac{0,65 \cdot U_{ном}}{U_{ном}} \cdot n_e = 0,65 \cdot n_e$$

Результаты расчетов заносим в таблицу 7. На основании расчетов строим искусственную характеристику (рис.8, линия 3).

Таблица 7.

I^*	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4	1,6	1,8
$I, \text{ А}$	34,4	51,6	68,8	86	103,2	120,4	137,6	154,8
n^*	1,7	1,3	1,1	1	0,9	0,8	0,75	0,7
$n, \text{ об/мин}$	1020	780	660	600	540	480	450	420
M^*	0,25	0,5	0,7	1	1,3	1,6	1,9	2,2
$M, \text{ Н} \cdot \text{м}$	63,75	127,5	178,5	255	331,5	408	484,5	561
$n_{и1}, \text{ об/мин}$	736	445	273	148	39	-54	-139	-217
$n_{и2}, \text{ об/мин}$	663	507	429	390	351	312	293	273

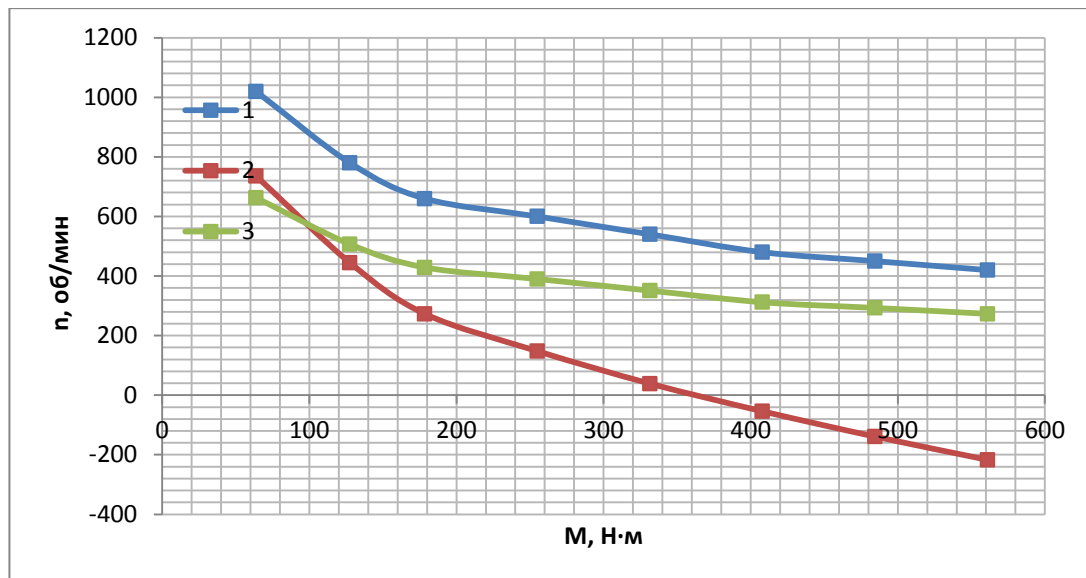


Рисунок 8. Механические характеристики ДПТ ПВ

Расчетно-графическое задание №6.

Тема «Расчет и построение механических характеристик двигателей постоянного тока»

Задание:

Двигатель постоянного тока имеет параметры, указанные в таблицах 8,9.

Требуется:

Рассчитать и построить:

- естественную характеристику двигателя;
- искусственную характеристику при введении в цепь ротора добавочного сопротивления;
- искусственную характеристику при снижении напряжения сети.

Параметры для расчета искусственных характеристик указаны в таблице 10.

Таблица 8. Тип ЭД (по первой цифре варианта).

Вариант	1,3,5,7,9	0,2,4,6,8
Тип ЭД	ДПТ НВ	ДПТ ПВ
$U_{ном}$, В	220	220

Таблица 9. Паспортные данные двигателя (по второй цифре варианта).

Вар-т	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$P_{ном}$, кВт	9	5	12	12	9,5	4	10	16	17	8
$n_{ном}$, об/мин	850	1000	750	1050	950	700	800	650	900	1250
$I_{ном}$, А	44	24	56	57	48	20	50	74	78	38

Таблица 10. Данные для расчета искусственных характеристик (по последней цифре варианта).

Вар-т	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
r_{∂} , Ом	0,2	1,3	0,14	0,8	1,6	0,7	0,08	2,2	0,42	1,15
U/U_n	0,4	0,8	0,75	0,44	0,62	0,7	0,9	0,37	0,5	0,68

7. Пуск двигателя постоянного тока

Пуск двигателей постоянного тока осуществляется тремя способами: прямым включением в сеть, с помощью пускового реостата и при пониженном напряжении в цепи якоря.

Реостатный пуск является наиболее распространенным. Для уменьшения пускового тока в цепь обмотки якоря включают добавочное сопротивление – пусковой реостат r_n . Тогда $I_n = \frac{U}{\Sigma r + r_n}$

Величина r_n выбирается такой, чтобы $I_n = (1,4 \div 2,5)I_n$. r

Пусковые реостаты выполняются металлическими, секционными. Это значит, что сопротивление r_n изменяется дискретно, ступенями.

В первый момент пуска ток якоря двигателя достигает максимального значения $I_{nmax} = I_n = (1,4 \div 2,5)I_n$, который называют максимальным пусковым током. С увеличением частоты вращения n ток в обмотке якоря уменьшается и при достижении заданной величины $I_{amin} = (1,0 \div 1,3)I_n$ (минимальный ток переключения) сопротивление r_n уменьшается на одну ступень. При этом ток якоря мгновенно увеличится до величины максимального пускового тока, и т.д. То есть по мере разгона двигателя пусковое сопротивление постепенно уменьшают, а когда скорость достигает установившегося значения – выводят полностью. Величины сопротивлений ступеней пускового реостата выбирают так, чтобы максимальный пусковой ток и минимальный ток переключения на всех ступенях реостата были одинаковыми.

Определить величину r_n можно двумя методами: аналитическим и графоаналитическим.

Пример №9.

Двигатель постоянного тока независимого возбуждения имеет следующие параметры: номинальная мощность $P_{ном} = 14$ кВт, напряжение питания $U_{ном} = 220$ В, номинальная частота вращения $n_{ном} = 1000$ об/мин, номинальный ток нагрузки $I_{ном} = 76$ А.

Требуется рассчитать сопротивление ступеней пускового реостата.

Расчет произвести двумя методами.

Решение:

I. Графоаналитический метод.

1) КПД двигателя в режиме номинальной нагрузки

$$\eta_{ном} = \frac{P_{ном}}{U_{ном} \cdot I_{ном}} = \frac{14 \cdot 10^3}{220 \cdot 76} = 0,84$$

2) Сопротивление в цепи якоря определяем, принимая, что половина всех потерь в двигателе при номинальной нагрузке связана с потерями в обмотке якоря

$$\Sigma r = 0,5 \cdot \frac{U_{ном}}{I_{ном}} \cdot (1 - \eta_{ном}) = 0,5 \cdot \frac{220}{76} \cdot (1 - 0,84) = 0,23 \text{ Ом}$$

3) Коэффициент

$$c_E \cdot \Phi = \frac{U_{ном} - I_{аном} \cdot \Sigma r}{n_{ном}} = \frac{220 - 76 \cdot 0,23}{1000} = 0,203$$

4) Скорость идеального холостого хода

$$n_0 = \frac{U_{ном}}{c_E \cdot \Phi} = \frac{220}{0,203} = 1084 \text{ об/мин}$$

5) Принимаем значения:

- максимальный пусковой ток

$$I_1 = 2 \cdot I_{аном} = 2 \cdot 76 = 152 \text{ А}$$

- минимальный ток переключения

$$I_2 = I_{аном} = 76 \text{ А}$$

6) Сопротивление резистора первой ступени пускового реостата

$$r_1 = \frac{U_{ном}}{I_1} = \frac{220}{152} = 1,45 \text{ Ом}$$

7) По полученным данным строим нормальную пусковую диаграмму (рис.9).

8) Согласно диаграмме для выбранных значений тока получено четыре ступени пуска, следовательно дальнейший расчет производим для четырех ступеней.

9) Сопротивление ступеней пускового реостата:

- для первой ступени

$$r_{п1} = r_1 \cdot \frac{ef}{af} = 1,45 \cdot \frac{46}{98} = 0,68 \text{ Ом}$$

- для второй ступени

$$r_{п2} = r_1 \cdot \frac{de}{af} = 1,45 \cdot \frac{23}{98} = 0,34 \text{ Ом}$$

- для третьей ступени

$$r_{п3} = r_1 \cdot \frac{cd}{af} = 1,45 \cdot \frac{12}{98} = 0,18 \text{ Ом}$$

- для четвертой ступени

$$r_{п4} = r_1 \cdot \frac{bc}{af} = 1,45 \cdot \frac{5}{98} = 0,07 \text{ Ом}$$

10) Сопротивление пускового реостата

$$r_{п} = r_{п1} + r_{п2} + r_{п3} + r_{п4} = 0,68 + 0,34 + 0,18 + 0,07 = 1,27 \text{ Ом}$$

II. Аналитический метод.

1) Оставляем значения токов, выбранных в графоаналитическом методе расчета.

2) Отношение токов

$$\lambda = \frac{I_1}{I_2} = \frac{152}{76} = 2$$

3) Сопротивление резисторов ступеней пускового реостата

- первой ступени

$$r_1 = \frac{U_{ном}}{I_1} = \frac{220}{152} = 1,45 \text{ Ом}$$

- второй ступени

$$r_2 = \frac{r_1}{\lambda} = \frac{1,45}{2} = 0,73 \text{ Ом}$$

- третьей ступени

$$r_3 = \frac{r_2}{\lambda} = \frac{0,73}{2} = 0,36 \text{ Ом}$$

- четвертой ступени

$$r_4 = \frac{r_3}{\lambda} = \frac{0,36}{2} = 0,18 \text{ Ом}$$

Так как $r_4 < \Sigma r$, то нецелесообразно использовать четырехступенчатый пусковой реостат. Дальнейший расчет производится для трех ступеней пуска.

4) Сопротивление ступеней пускового реостата:

- для первой ступени

$$r_{п1} = r_1 - r_2 = 1,45 - 0,73 = 0,72 \text{ Ом}$$

- для второй ступени

$$r_{п2} = r_2 - r_3 = 0,73 - 0,36 = 0,36 \text{ Ом}$$

- для третьей ступени

$$r_{п3} = r_3 - \Sigma r = 0,36 - 0,23 = 0,13 \text{ Ом}$$

5) Сопротивление пускового реостата

$$r_{п} = r_{п1} + r_{п2} + r_{п3} = 0,72 + 0,36 + 0,13 = 1,21 \text{ Ом}$$

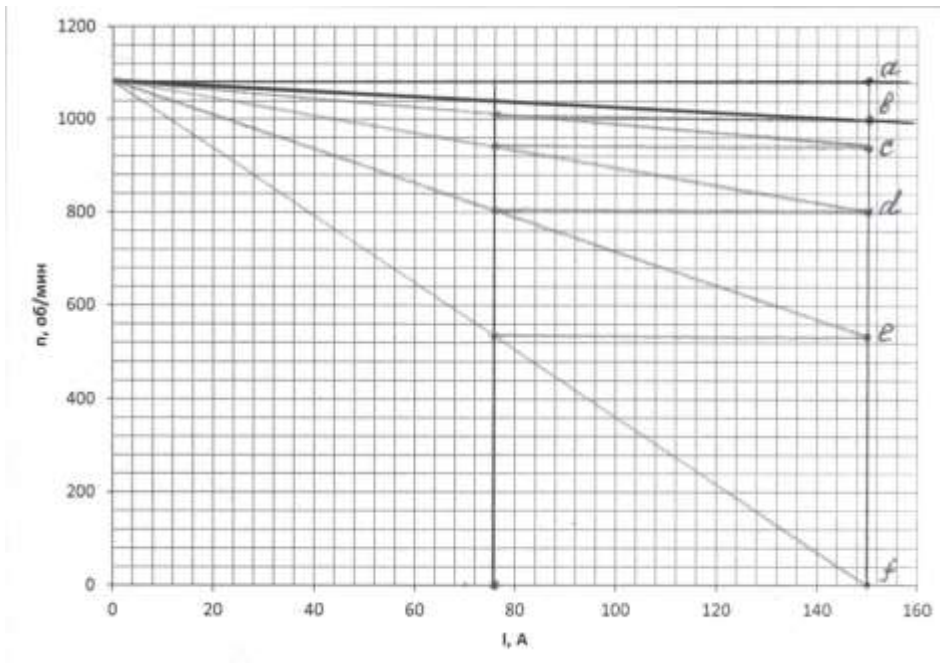


Рисунок 9. Нормальная пусковая диаграмма ДПТ НВ

Пример №10.

Двигатель постоянного тока последовательного возбуждения имеет следующие параметры: номинальная мощность $P_{ном} = 16$ кВт, напряжение питания $U_{ном} = 220$ В, номинальная частота вращения $n_{ном} = 600$ об/мин, номинальный ток нагрузки $I_{ном} = 86$ А.

Требуется рассчитать сопротивление ступеней пускового реостата.

Решение:

- 1) КПД двигателя в режиме номинальной нагрузки

$$\eta_{ном} = \frac{P_{ном}}{U_{ном} \cdot I_{ном}} = \frac{16 \cdot 10^3}{220 \cdot 86} = 0,85$$

- 2) Сопротивление двигателя

$$r_{дв} = \Sigma r + r_v = \Sigma r + 0,5 \cdot \Sigma r = 0,75 \cdot \frac{U_{ном}}{I_{ном}} \cdot (1 - \eta_{ном}) = 0,75 \cdot \frac{220}{86} \cdot (1 - 0,85) = 0,3 \text{ Ом}$$

- 3) Принимаем значения:

- максимальный пусковой ток

$$I_1 = 2 \cdot I_{аном} = 2 \cdot 86 = 172 \text{ А}$$

- минимальный ток переключения

$$I_2 = 1,3 \cdot I_{аном} = 1,3 \cdot 86 = 112 \text{ А}$$

- 4) Сопротивления при постоянных значениях токов I_1 и I_2 соответственно

$$r_1 = \frac{U_{ном}}{I_1} = \frac{220}{172} = 1,3 \text{ Ом}$$

$$r_2 = \frac{U_{ном}}{I_2} = \frac{220}{112} = 2 \text{ Ом}$$

5) По полученным данным строим нормальную пусковую диаграмму (рис.10). Естественную скоростную характеристику строим по данным таблицы 7.

6) Согласно диаграмме для выбранных значений тока получено две ступени пуска, следовательно дальнейший расчет производим для двух ступеней.

- 7) Сопротивление ступеней пускового реостата:

- для первой ступени $r_{п1} = 0,56 \text{ Ом}$

- для второй ступени $r_{п2} = 0,44 \text{ Ом}$

- 8) Сопротивление пускового реостата

$$r_{п} = r_{п1} + r_{п2} = r_1 - r_{дв} = 0,56 + 0,44 = 1,3 - 0,3 = 1 \text{ Ом}$$

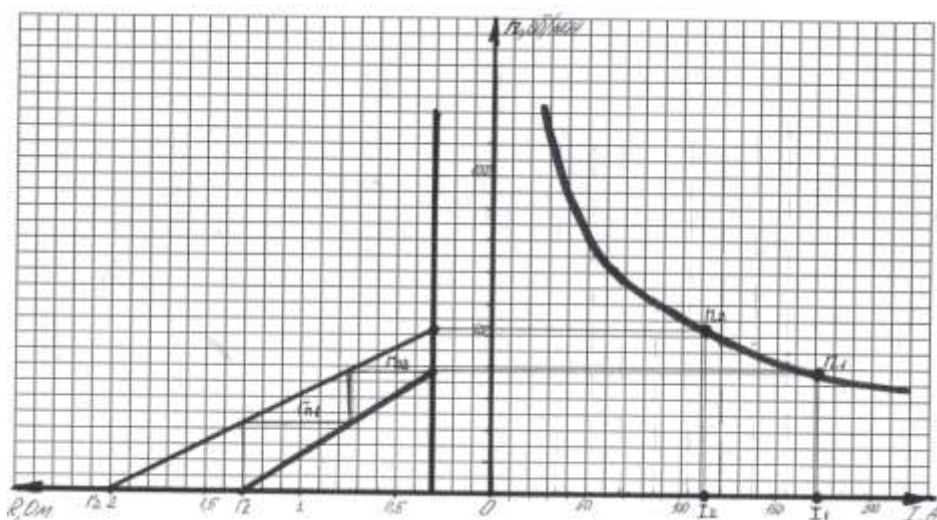


Рисунок 10. Нормальная пусковая диаграмма ДПТ ПВ

Расчетно-графическое задание №7.

Тема «Расчет пусковых сопротивлений двигателей постоянного тока»

Задание:

Двигатель постоянного тока имеет параметры, указанные в таблицах 11 и 12.

Требуется:

Построить нормальную пусковую диаграмму и рассчитать ступени пускового реостата двигателя.

Для ДПТ НВ расчет произвести двумя методами.

Число ступеней пуска $m = 2 - 4$.

Таблица 11. Тип ЭД (по 2-й цифре варианта)

Вариант	1,3,5,7,9	0,2,4,6,8
Тип ЭД	ДПТ НВ	ДПТ ПВ
$U_{ном}, В$	220	220

Таблица 12. Паспортные данные двигателя (по 3-й цифре варианта)

Вар-т	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$P_{ном}, кВт$	9	5	12	12	9,5	4	10	16	17	8
$n_{ном}, об/мин$	850	1000	750	1050	950	700	800	650	900	1250
$I_{ном}, А$	44	24	56	57	48	20	50	74	78	38

8. Регулирование скорости двигателя постоянного тока

Частоту вращения двигателя постоянного тока можно регулировать тремя способами:

- 1) изменением сопротивления в цепи обмотки якоря r_p ;
- 2) изменением магнитного потока возбуждения Φ ;
- 3) изменением напряжения, подводимого к обмотке якоря, U .

Регулирование частоты вращения изменением сопротивления в цепи обмотки якоря нашло широкое распространение при невысоких требованиях к показателям качества регулирования скорости. Способ очень прост в реализации. Для его реализации в цепь обмотки якоря включается последовательно регулировочный реостат (r_p), рассчитанный на длительный режим работы. При этом полное сопротивление цепи якоря увеличится на величину этого сопротивления.

Этот способ регулирования частоты вращения характеризуется следующим: подводимая к двигателю мощность $P_1 = U \cdot I_a$ остается без изменений; полезная мощность $P_2 = M_2 \cdot 2\pi \cdot n$ и КПД $\eta = P_2 / P_1$ уменьшаются; условия охлаждения двигателя ухудшаются. Пределы регулирования от n_n до 0.

Пример №11.

Двигатель постоянного тока независимого возбуждения имеет следующие паспортные данные: номинальная мощность $P_{ном} = 4,8$ кВт, напряжение питания $U_{ном} = 220$ В, номинальная частота вращения $n_{ном} = 1500$ об/мин, номинальный ток нагрузки $I_{ном} = 24,2$ А, сопротивление в цепи якоря $\Sigma r = 0,38$ Ом, ток возбуждения $i_b = 0,8$ А. Определить сопротивление резистора, включение которого обеспечит прохождение характеристики через точку с координатами $n_p = 1000$ об/мин, $M_p = 25$ Н·м.

Решить задачу двумя методами.

Решение:

I. Метод пропорций:

1) Номинальный момент двигателя

$$M_{ном} = 9,55 \cdot \frac{P_{ном}}{n_{ном}} = 9,55 \cdot \frac{4,8 \cdot 10^3}{1500} = 30,56 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

2) Коэффициенты:

$$c_M \cdot \Phi = \frac{M_{ном}}{I_{ном}} = \frac{30,56}{24,2} = 1,26$$

$$c_E \cdot \Phi = 0,105 \cdot c_M \cdot \Phi = 0,105 \cdot 1,26 = 0,132$$

3) Скорость холостого хода

$$n_0 = \frac{U_{ном}}{c_E \cdot \Phi} = \frac{220}{0,132} = 1667 \text{ об/мин}$$

4) Перепад скорости на естественной характеристике при $M_p = 25$ Н·м

$$\Delta n_e = \frac{M_p \cdot \Sigma r}{c_E \cdot \Phi \cdot c_M \cdot \Phi} = \frac{25 \cdot 0,38}{0,132 \cdot 1,26} = 45 \text{ об/мин}$$

5) Перепад скорости на искусственной характеристике при $M_p = 25$ Н·м

$$\Delta n_{и} = n_0 - n_p = 1667 - 1000 = 667 \text{ об/мин}$$

6) Сопротивление регулировочного резистора

$$r_p = \Sigma r \cdot \left(\frac{\Delta n_{и}}{\Delta n_e} - 1 \right) = 0,38 \cdot \left(\frac{667}{45} - 1 \right) = 2,47 \text{ Ом}$$

II. Метод отрезков:

1) В одних осях строим естественную и искусственную механические характеристики (рис.11)

2) Номинальное сопротивление

$$r_{ном} = \frac{U_{ном}}{I_{ном}} = \frac{220}{24,2} = 9,1 \text{ Ом}$$

3) Сопротивление регулировочного резистора

$$r_p = r_{ном} \cdot \frac{bc}{ad} = 9,1 \cdot \frac{27}{89} = 2,76 \text{ Ом}$$

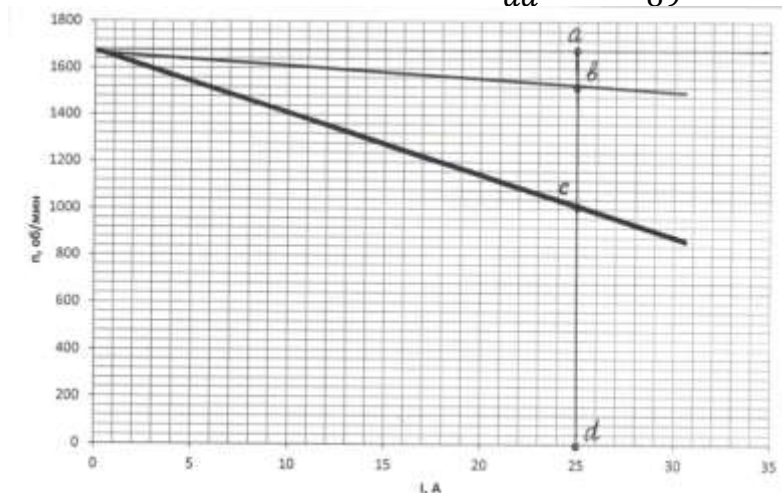


Рисунок 11. Характеристики ДПТ НВ

Пример №12.

Двигатель постоянного тока последовательного возбуждения имеет следующие паспортные данные: номинальная мощность $P_{ном} = 8$ кВт, напряжение питания $U_{ном} = 220$ В, номинальная частота вращения $n_{ном} = 800$ об/мин, номинальный ток нагрузки $I_{ном} = 46,5$ А, КПД $\eta_{ном} = 0,78$. Определить сопротивление резистора, включение которого обеспечит прохождение характеристики через точку с координатами $n_p = 500$ об/мин, $I_p = 40$ А и построить эту характеристику.

Решение:

1) Сопротивление двигателя

$$r_{дв} = \Sigma r + r_{\text{в}} = \Sigma r + 0,5 \cdot \Sigma r = 0,75 \cdot \frac{U_{ном}}{I_{ном}} \cdot (1 - \eta_{ном}) = 0,75 \cdot \frac{220}{46,5} \cdot (1 - 0,78) = 0,78 \text{ Ом}$$

2) Для определения скорости на естественной характеристике при токе $I_p = 40$ А необходимо построить естественную характеристику (рис.12). Для ее построения воспользуемся универсальными характеристиками (рис.4). Расчеты сведены в таблице 13.

Таблица 13.

I^*	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4	1,6	1,8
$I, \text{А}$	18,6	27,9	37,2	46,5	55,8	65,1	74,4	83,7
n^*	1,7	1,3	1,1	1	0,9	0,8	0,75	0,7
$n, \text{об/мин}$	1360	1040	880	800	720	640	600	560
$n_{\text{н}}, \text{об/мин}$	1166	809	609	480	360	251	165	81

3) По характеристике определяем $n_e = 840$ об/мин

4) Сопротивление регулировочного резистора

$$r_p = \left(\frac{U_{ном}}{I_p} - r_{дв} \right) \cdot \left(1 - \frac{n_p}{n_e} \right) = \left(\frac{220}{40} - 0,78 \right) \cdot \left(1 - \frac{500}{840} \right) = 1,58 \text{ Ом}$$

5) Для данного сопротивления резистора строим регулировочную характеристику (рис.12), расчёт сводим в табл.13.

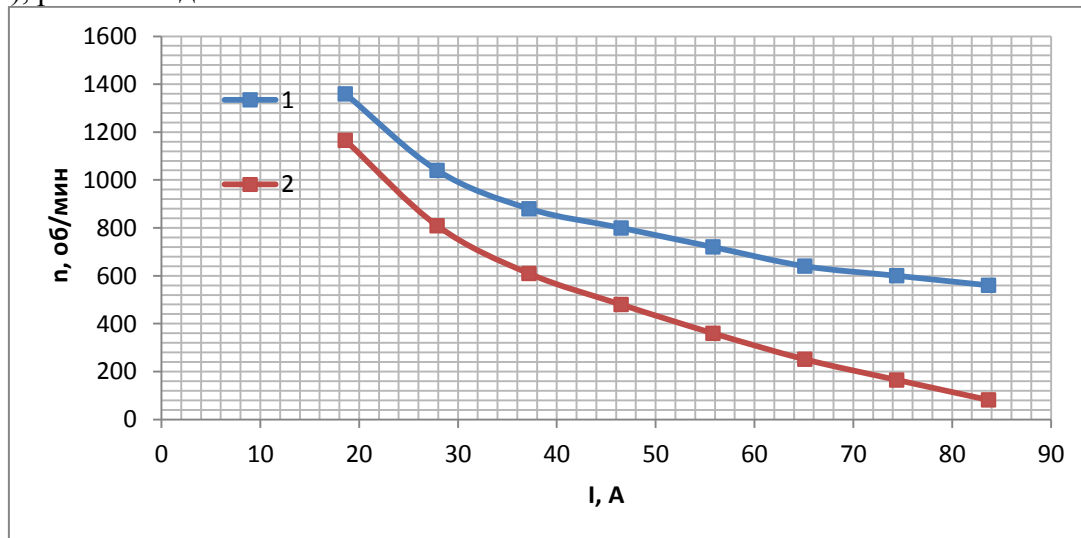


Рисунок 12. Характеристики ДПТ ПВ

Расчетно-графическое задание №8.

Тема: «Расчет регулировочных резисторов и построение регулировочных характеристик двигателей постоянного тока»

Задание:

Двигатель постоянного тока имеет параметры, указанные в таблицах 14, 15.

Требуется:

1. Рассчитать добавочное сопротивление, при включении которого в цепь ротора:

а) механическая характеристика пройдет через точку с координатами $n_p = k \cdot n_{ном}$, $M_p = h \cdot M_{ном}$ ($I_p = h \cdot I_{ном}$);

- б) угловая скорость снизится в t раз при номинальном моменте нагрузки.
 Параметры для расчета регулировочных сопротивлений приведены в таблице 16.
 2. Построить естественную и регулировочные характеристики.

Таблица 14. Тип ЭД (по первой цифре варианта)

Вариант	0,2,4,6,8	1,3,5,7,9
Тип ЭД	ДПТ НВ	ДПТ ПВ
$U_{ном}$, В	220	220

Таблица 15. Паспортные данные двигателя (по второй цифре варианта)

Вар-т	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$P_{ном}$, кВт	9	5	12	12	9,5	4	10	16	17	8
$n_{ном}$, об/мин	850	1000	750	1050	950	700	800	650	900	1250
$I_{ном}$, А	44	24	56	57	48	20	50	74	78	38

Таблица 16. Данные для расчета искусственных характеристик (по третьей цифре варианта)

Вар-т	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
k	0,4	0,6	0,2	0,5	0,3	0,7	0,25	0,45	0,54	0,8
h	0,9	0,7	0,85	0,8	0,92	0,76	0,66	0,72	0,6	0,88
t	1,5	2	1,2	2,5	3	2,2	1,8	2,1	2,7	2,6

9. Потери и КПД электрических машин

При работе любой электрической машины часть потребляемой ею энергии теряется и рассеивается в виде тепла. Мощность потерянной энергии называется потерями мощности или потерями.

Потери в электрических машинах делят на основные и добавочные. К основным потерям относят электрические, магнитные и механические. Все потери, неучтенные как основные, называются добавочными.

Рассчитать величину добавочных потерь с большой точностью практически невозможно. Поэтому согласно ГОСТ 183-74 они принимаются при номинальной нагрузке равными 1% от полезной мощности, если машина работает генератором и от потребляемой мощности, если она работает двигателем. В машинах с компенсационной обмоткой – 0,5 %.

Суммарные потери равны

$$\Sigma p = p_{эл} + p_c + p_{мех} + p_{доб}$$

КПД определяется как отношение полезной, или отдаваемой, мощности P_2 к потребляемой мощности P_1

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \text{ или в процентах } \eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100\%$$

Величина КПД в современных электрических машинах велика, поэтому P_2 и P_1 являются близкими величинами. Кроме того, большие сложности возникают при экспериментальном определении механической мощности. В связи с этим КПД обычно определяется по величине электрической мощности и сумме потерь Σp .

В этом случае выражение для КПД примет вид:

Для двигателя $P_2 = P_1 - \Sigma p$

$$\eta_d = \frac{P_1 - \Sigma p}{P_1} = 1 - \frac{\Sigma p}{P_1}$$

Для генератора $P_1 = P_2 + \Sigma p$

$$\eta_g = \frac{P_2}{P_2 + \Sigma p} = 1 - \frac{\Sigma p}{P_2 + \Sigma p}$$

Пример №13.

Генератор постоянного тока с параллельным возбуждением имеет следующие данные: номинальная мощность $P_{ном}=10$ кВт, напряжение $U_{ном}=230$ В, сопротивление цепи обмотки якоря $\Sigma r = 0,3$ Ом, обмотки возбуждения $r_e=150$ Ом. Определить КПД генератора, если сумма механических, магнитных и добавочных потерь составляет 6% от номинальной мощности.

Решение:

1. Полный ток генератора в номинальном режиме

$$I_H = \frac{P_H}{U_H} = \frac{10 \cdot 10^3}{230} = 43,5 \text{ A}$$

2. Ток в обмотке возбуждения

$$i_B = \frac{U_H}{r_B} = \frac{230}{150} = 1,5 \text{ A}$$

3. Ток в обмотке якоря

$$I_a = I_H + i_B = 43,5 + 1,5 = 45 \text{ A}$$

4. Потери в цепи обмотки якоря

$$p_{эл} = \Sigma r \cdot I_a^2 = 0,3 \cdot 45^2 = 607,5 \text{ Вт}$$

5. Потери в цепи обмотки возбуждения

$$p_B = U_H \cdot i_B = 230 \cdot 1,5 = 345 \text{ Вт}$$

6. Суммарные потери

$$\begin{aligned} \Sigma p &= p_{эла} + p_B + p_{мех} + p_c + p_{доб} = p_{эла} + p_B + 0,06 \cdot P_{ном} \\ &= 607,5 + 345 + 0,06 \cdot 10 \cdot 10^3 = 1552,5 \text{ Вт} \end{aligned}$$

7. КПД генератора

$$\eta = 1 - \frac{\Sigma p}{P_{ном} + \Sigma p} = 1 - \frac{1552,5}{10 \cdot 10^3 + 1552,5} = 0,866$$

Расчетно-графическое задание №9.

Тема: «Расчет потерь и к.п.д. электрических машин»

Задание:

Генератор постоянного тока с параллельным возбуждением имеет данные, представленные в таблице 17.

Требуется:

Определить КПД генератора.

Таблица 17 (по последней цифре варианта)

Вар-т	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$P_{ном}, \text{кВт}$	9	5	12	12	9,5	4	10	16	17	8
$U_{ном}, \text{В}$	230	230	460	230	460	230	230	460	460	230
$\Sigma r, \text{Ом}$	0,25	0,4	0,12	0,09	0,3	0,36	0,2	0,11	0,08	0,15
$r_B, \text{Ом}$	120	140	225	160	240	112	144	255	280	155
$p_{мех} + p_c + p_{доб}$	$0,075P_H$	$0,07P_H$	$0,065P_H$	$0,078P_H$	$0,066P_H$	$0,08P_H$	$0,085P_H$	$0,077P_H$	$0,082P_H$	$0,068P_H$

Тема 1.2. Трансформаторы

1. Параметры холостого хода и короткого замыкания трансформатора

Холостым ходом трансформатора называется такой режим его работы, когда первичная обмотка включена в сеть, а вторичная обмотка разомкнута. В этом случае трансформатор подобен катушке со стальным сердечником.

Под действием напряжения u_1 в первичной обмотке возникает ток холостого хода i_o , который создает МДС $w_1 \cdot I_o$ и магнитный поток Φ ; меньшая часть потока сцеплена только с первичной обмоткой – это поток рассеяния $\Phi_{\sigma 1}$.

Считается, что все потери при холостом ходе – это потери в стали. Потери в стали состоят из потерь на гистерезис и потерь на вихревые токи. Обычно, как в машинах постоянного тока, они рассчитываются по величине удельных потерь. Это основные потери. Кроме основных в стали сердечника возникают добавочные потери (в конструктивных элементах, в изоляции трансформаторов и т.п.), которые составляют обычно (15÷20) % от основных. Поэтому

$$p_c = p_{c.o} + p_{c.доб} = (1,15 \div 1,2) \cdot p_{осн}$$

Коротким замыканием трансформатора называется такой режим работы, когда вторичная обмотка замкнута накоротко, а к первичной обмотке подводится напряжение.

Если напряжение, подводимое к первичной обмотке, равно номинальному ($U_1 = U_{1ном}$), то ток короткого замыкания достигает значений $I_{1к} \geq (10 \div 20) \cdot I_{1ном}$. Такое короткое замыкание возникает в эксплуатационных условиях и поэтому называется эксплуатационным коротким замыканием. Из-за больших токов оно представляет значительную опасность, поэтому в схеме включения трансформатора устанавливается защита, отключающая его при коротких замыканиях.

Другим видом является опытное короткое замыкание. В этом случае к первичной обмотке подводится пониженное напряжение $U_{1к}$, такое, чтобы токи в обмотках трансформатора были равны номинальным. Если выразить это напряжение в процентах по отношению к номинальному, то получим величину, которая называется напряжением короткого замыкания

$$u_k = \frac{U_{1к}}{U_{1ном}} \cdot 100\%$$

В силовых трансформаторах $u_k = (5 \div 10)\%$. Как величина весьма важная, она указывается в паспортных данных трансформатора.

При коротком замыкании основной магнитный поток мал, поэтому потерями в стали сердечника можно пренебречь и считать, что мощность, потребляемая трансформатором при коротком замыкании, расходуется только на потери в обмотках

$$p_k = p_{эл1} + p_{эл2}$$

Пример №14.

Трехфазный масляный трансформатор ТМ-630/10 имеет следующие параметры: номинальная мощность $S_{ном} = 630$ кВА, номинальное первичное напряжение $U_{1ном} = 10$ кВ, вторичное – $U_{2ном} = 0,4$ кВ, напряжение короткого замыкания $u_k = 5,5\%$, мощность короткого замыкания $P_{к.ном} = 7,6$ кВт, мощность холостого хода $P_{0ном} = 1,56$ кВт, ток холостого хода $i_0 = 2\%$. Обмотки соединены по схеме Y/Y.

Определить номинальный ток в первичной обмотке $I_{1ном}$, ток I_0 и коэффициент мощности $\cos \varphi_0$ холостого хода, напряжение U_k и коэффициент мощности $\cos \varphi_k$ короткого замыкания, сопротивление короткого замыкания z_k , его активную и реактивную составляющие r_k , x_k . Построить треугольник короткого замыкания.

Решение:

- 1) Номинальный ток в первичной обмотке

$$I_{1ном} = \frac{S_{ном}}{\sqrt{3} \cdot U_{1ном}} = \frac{630 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 10 \cdot 10^3} = 36,4 \text{ А}$$

- 2) Ток холостого хода

$$I_0 = \frac{i_0}{100} \cdot I_{1ном} = \frac{2}{100} \cdot 36,4 = 0,73 \text{ А}$$

- 3) Коэффициент мощности холостого хода

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3} \cdot I_0 \cdot U_{1ном}} = \frac{1,56 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 0,73 \cdot 10 \cdot 10^3} = 0,123$$

- 4) Напряжение короткого замыкания

$$U_k = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_{1ном}}{\sqrt{3}} = \frac{5,5}{100} \cdot \frac{10 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} = 318 \text{ В}$$

- 5) Коэффициент мощности короткого замыкания

$$\cos \varphi_k = \frac{P_k}{3 \cdot I_{1ном} \cdot U_k} = \frac{7,6 \cdot 10^3}{3 \cdot 36,4 \cdot 318} = 0,22$$

$$\varphi_k = 77^\circ$$

$$\sin \varphi_k = 0,975$$

- 6) Сопротивление короткого замыкания

$$z_k = \frac{U_k}{I_{1ном}} = \frac{318}{36,4} = 8,74 \text{ Ом}$$

- 7) Активная и реактивная составляющие сопротивления короткого замыкания

$$r_k = z_k \cdot \cos \varphi_k = 8,74 \cdot 0,22 = 1,92 \text{ Ом}$$

$$x_k = z_k \cdot \sin \varphi_k = 8,74 \cdot 0,975 = 8,52 \text{ Ом}$$

8) Стороны треугольника напряжения короткого замыкания

$$U_k = I_{1k} \cdot z_k = 36,4 \cdot 8,74 = 318 \text{ В}$$

$$U_{ка} = I_{1k} \cdot r_k = 36,4 \cdot 1,92 = 70 \text{ В}$$

$$U_{кр} = I_{1k} \cdot x_k = 36,4 \cdot 8,52 = 310 \text{ В}$$

9) Принимаем масштаб напряжения $m_U = 5 \text{ В/мм}$, тогда длина сторон треугольника короткого замыкания (рис.15)

$$U_k = \frac{318}{5} = 64 \text{ мм}$$

$$U_{ка} = \frac{70}{5} = 14 \text{ мм}$$

$$U_{кр} = \frac{310}{5} = 62 \text{ мм}$$

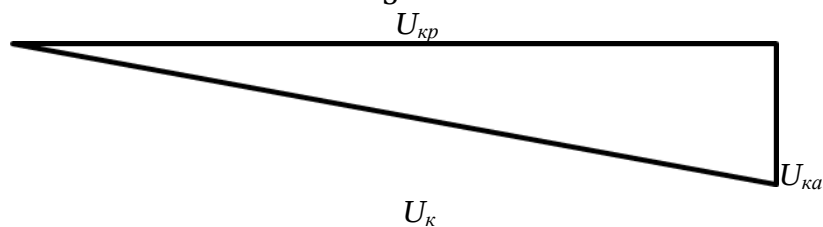


Рисунок 13. Треугольник напряжений короткого замыкания

Расчетно-графическое задание № 10.

Тема: «Параметры холостого хода и короткого замыкания трансформатора»

Задание:

Трехфазный масляный трансформатор имеет данные, указанные в таблицах 18-19. Обмотки соединены по схеме Y/Y.

Требуется:

Определить:

- номинальный ток в первичной обмотке $I_{ном}$,
- ток I_0 и коэффициент мощности $\cos \varphi_0$ холостого хода,
- напряжение U_k и коэффициент мощности $\cos \varphi_k$ короткого замыкания,
- сопротивление короткого замыкания z_k , его активную и реактивную составляющие r_k , x_k .

Построить треугольник короткого замыкания.

Таблица 18(по второй цифре).

наименован величины	вариант									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
тип	ТМ-40/6	ТМ-63/10	ТМ-100/6	ТМ-160/10	ТМ-250/6	ТМ-1000/10	ТМ-1600/10	ТМ-2500/10	ТМ-4000/10	ТМ-6300/10
$S_{ном}$, кВА	40	63	100	160	250	1000	1600	2500	4000	6300
$U_{I_{ном}}$, кВ	6	10	6	10	6	10	10	10	10	10
$U_{2ном}$, кВ	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
P_0 , кВт	0,175	0,28	0,463	0,51	0,72	2,45	3,3	4,6	6,4	9
P_k , кВт	0,88	1,3	1,8	2,65	4,2	12,2	18	25	33,5	46

Таблица 19 (по третьей цифре).

Наименование величин	Варианты									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
u_k , %	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5
i_0 , %	3,6	4,5	2,6	2,4	2,2	1,4	1,3	1	0,9	0,8

2. Векторная диаграмма трансформатора

Работу трансформатора, описанную уравнениями, можно представить в виде векторной диаграммы.

Построение векторной диаграммы осуществляется на основании уравнений и начинается с вектора основного магнитного потока Φ_m . ЭДС отстают от магнитного потока на 90° . Если нагрузка активно-индуктивная, то ток I_2' отстает от ЭДС на угол φ_2 , если активно-емкостная – опережает.

Пример №15.

Для однофазного трансформатора номинальной мощностью $S_{ном} = 600$ кВА и номинальным первичным напряжением $U_{Iном} = 31,5$ кВ, мощностью короткого замыкания $P_{к.ном} = 20$ кВт и напряжением короткого замыкания $u_k = 8,5\%$ рассчитать данные и построить график зависимости изменения вторичного напряжения ΔU от коэффициента нагрузки β , если коэффициент мощности нагрузки $\cos \varphi_2 = 0,75$ (емк). Построить упрощенную векторную диаграмму (током холостого хода пренебречь), при этом рассмотреть два случая номинальной нагрузки трансформатора при значении коэффициента мощности $\cos \varphi_1 = 0,7$: индуктивную и емкостную; определить из векторной диаграммы $\cos \varphi_2$.

Решение:

- 1) Напряжение короткого замыкания

$$U_{1к} = \frac{u_k}{100} \cdot U_{Iном} = \frac{8,5}{100} \cdot 31,5 \cdot 10^3 = 2677,5 \text{ В}$$

- 2) Ток короткого замыкания

$$I_{1к} = I_{Iном} = \frac{S_{ном}}{U_{Iном}} = \frac{600 \cdot 10^3}{31,5 \cdot 10^3} = 19 \text{ А}$$

- 3) Коэффициент мощности режима короткого замыкания

$$\cos \varphi_k = \frac{P_{к.ном}}{U_{1к} \cdot I_{1к}} = \frac{20 \cdot 10^3}{2677,5 \cdot 19} = 0,393$$

$$\varphi_k = 67^\circ$$

$$\sin \varphi_k = 0,92$$

- 4) Активная и реактивная составляющие напряжения короткого замыкания

$$u_{ка} = u_k \cdot \cos \varphi_k = 8,5 \cdot 0,393 = 3,34\%$$

$$u_{кр} = u_k \cdot \sin \varphi_k = 8,5 \cdot 0,92 = 7,82\%$$

- 5) Задаемся рядом значений коэффициента нагрузки и по формуле

$$\Delta U = \beta \cdot (u_{ка} \cdot \cos \varphi_2 - u_{кр} \cdot \sin \varphi_2)$$

рассчитываем ΔU (знак «минус» в формуле обусловлен емкостным характером нагрузки). Результаты расчета сведены в табл.20. ($\varphi_2 = 41^\circ$; $\sin \varphi_2 = 0,66$).

Таблица 20.

β	0	0,25	0,5	0,75	1
$\Delta U, \%$	0	-0,66	-1,33	-1,99	-2,66

На рис.14 приведен график зависимости изменения вторичного напряжения ΔU от коэффициента нагрузки β .

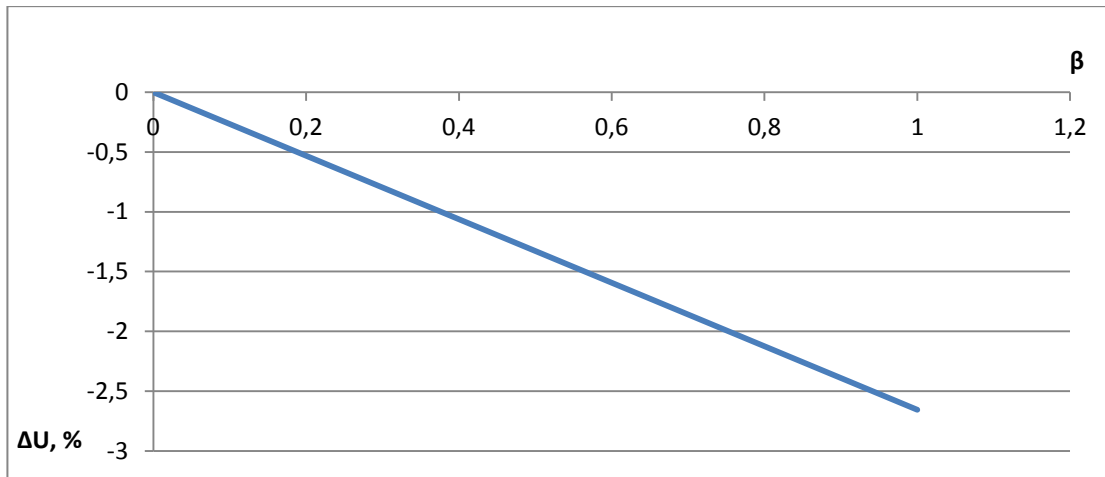


Рисунок 14. График зависимости изменения вторичного напряжения ΔU от коэффициента нагрузки β

Следовательно, с ростом нагрузки трансформатора напряжение на зажимах вторичной обмотки увеличивается, что связано с емкостным характером нагрузки трансформатора.

6) Параметры, необходимые для построения векторной диаграммы:

- номинальное первичное напряжение

$$U_{1\text{ном}} = 31,5 \text{ кВ}$$

- активное напряжение короткого замыкания

$$U_{\text{ка}} = \frac{u_{\text{ка}}}{100} \cdot U_{1\text{ном}} = \frac{3,34}{100} \cdot 31,5 \cdot 10^3 = 1052 \text{ В}$$

- реактивное напряжение короткого замыкания

$$U_{\text{кр}} = \frac{u_{\text{кр}}}{100} \cdot U_{1\text{ном}} = \frac{7,82}{100} \cdot 31,5 \cdot 10^3 = 2463 \text{ В}$$

- номинальный ток в первичной цепи

$$I_{1\text{ном}} = 19 \text{ А}$$

- угол фазового сдвига $\varphi_1 = \arccos 0,7 = 46^\circ$

7) По имеющимся данным строим векторную диаграмму (рис.15).

Порядок построения:

1. Выбираем масштаб напряжения $m_U = 200 \text{ В/мм}$. При этом длина векторов составит:

- первичного напряжения $U_{1\text{ном}} = \frac{31,5 \cdot 10^3}{200} = 157,5 \text{ мм}$

- активного напряжения короткого замыкания $U_{\text{ка}} = \frac{1052}{200} = 5 \text{ мм}$

- реактивного напряжения короткого замыкания $U_{\text{кр}} = \frac{2463}{200} = 12 \text{ мм}$

2. На оси ординат строим вектор тока $I_{1\text{ном}} = -\dot{I}_2'$ произвольной длины.

3. Для активно-индуктивной нагрузки: строим вектор напряжения $U_{1\text{ном}}$, который опережает ток на угол $\varphi_1 = 46^\circ$. Из конца этого вектора перпендикулярно вектору тока проводим вектор реактивного напряжения короткого замыкания $\dot{U}_{\text{кр}}$, а затем из конца этого вектора параллельно-встречно току строим вектор активного напряжения короткого замыкания $\dot{U}_{\text{ка}}$. Соединяем начало диаграммы с концом вектора $\dot{U}_{\text{ка}}$, получаем вектор приведенного значения вторичного напряжения $\dot{U}_2'$. $\dot{U}_2' = 146 \cdot 200 = 29,2 \text{ кВ}$. Измеряем угол $\varphi_2 = 42^\circ$ и определяем $\cos \varphi_2 = 0,74$.

4. Для активно-емкостной нагрузки выполняем аналогичные построения, но вектор напряжения $U_{1\text{ном}}$ отстает от тока на угол $\varphi_1 = 46^\circ$. $\dot{U}_2' = 164 \cdot 200 = 32,8 \text{ кВ}$. Измеряем угол $\varphi_2 = 50^\circ$ и определяем $\cos \varphi_2 = 0,64$.

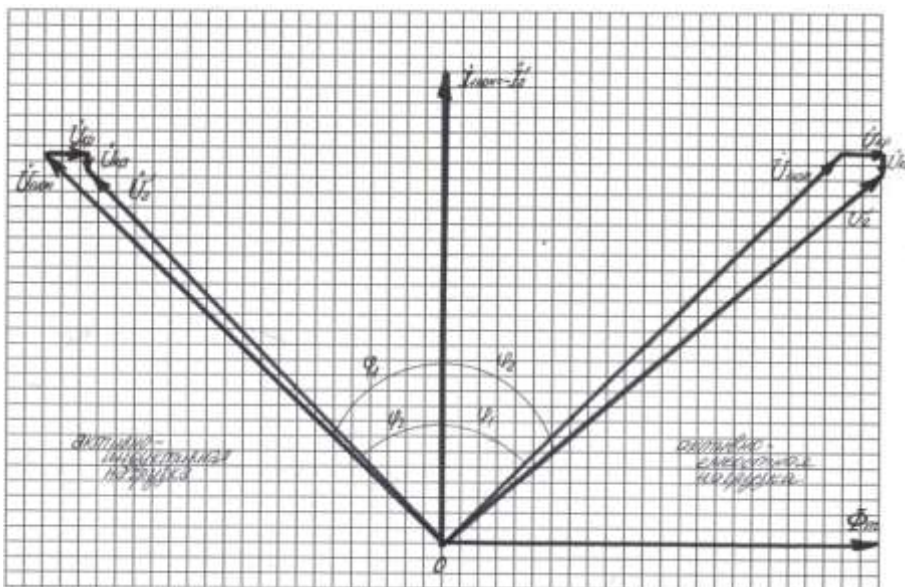


Рисунок 15. Векторная диаграмма трансформатора

Расчетно-графическое задание № 11.

Тема: «Векторная диаграмма трансформатора»

Задание:

Однофазный трансформатор имеет данные, указанные в таблице 21.

Требуется:

Рассчитать данные и построить график зависимости изменения вторичного напряжения ΔU от коэффициента нагрузки β .

Построить упрощенную векторную диаграмму (током холостого хода пренебречь), при этом рассмотреть два случая номинальной нагрузки трансформатора при значении коэффициента мощности $\cos \varphi_1 = 0,7$: индуктивную и емкостную; определить из векторной диаграммы $\cos \varphi_2$.

Таблица 21 (по третьей цифре).

наименован величины	вариант									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$S_{ном}$, кВА	660	250	800	200	180	560	320	150	220	180
$U_{1ном}$, кВ	31,5	6,3	31,5	6,3	6,3	10	10	3,4	6,3	10
$P_{к.ном}$, кВт	21	12	22	7	10	25	13	3,5	8	5,4
u_k , %	8	6,5	8,5	5,5	6,5	7	6,5	5,5	5,5	6
$\cos \varphi_2$	0,85(емк)	0,85(инд)	0,8(емк)	0,7(инд)	1	0,85(инд)	0,9(емк)	1	0,8(инд)	0,75(инд)

3. Расчет параметров трансформатора

Трансформатором называется статический электромагнитный аппарат, который служит для преобразования переменного тока из одного напряжения в другое при неизменной частоте.

Принцип работы трансформатора основан на законе электромагнитной индукции. Трансформатор состоит из двух или нескольких обмоток, связанных электромагнитно. Для усиления магнитной связи, обмотки располагаются на стальном сердечнике.

Согласно второму закону Кирхгофа, уравнения равновесия напряжений для обмотки трансформатора можно записать в виде:

$$\begin{aligned} u_1 &= -e_1 - e_{\sigma 1} + r_1 \cdot i_1 \\ u_2 &= e_2 + e_{\sigma 2} - r_2 \cdot i_2 \end{aligned}$$

Коэффициент трансформации

$$k = \frac{e_1}{e_2} = \frac{w_1}{w_2}$$

Уравнение МДС

$$w_1 \cdot i_1 + w_2 \cdot i_2 = w_1 \cdot i_0$$

где $w_1 \cdot i_0$ - намагничивающая составляющая МДС, идущая на создание в сердечнике основного магнитного потока.

В общем случае $w_1 \neq w_2$, следовательно, и $E_1 \neq E_2$ и $I_1 \neq I_2$. Это затрудняет сопоставление и количественный учет процессов, происходящих в обмотках трансформатора, особенно при больших коэффициентах трансформации. Чтобы избежать этого действительный трансформатор заменяется приведенным, когда обе обмотки приводят к одному числу витков. Обычно вторичную обмотку приводят к первичной. Для этого действительную вторичную обмотку заменяют приведенной с числом витков, равным w_1 . Режим работы трансформатора от приведения не изменяется.

Число витков приведенной вторичной обмотки

$$w'_2 = w_1$$

Приведенная ЭДС вторичной обмотки

$$E'_2 = E_1 = k \cdot E_2$$

$$E'_2 = E_1 = k \cdot E_2$$

Приведенный ток определяется из условия, что полная внутренняя мощность вторичной обмотки остается без изменений

$$I'_2 = \frac{1}{k} \cdot I_2$$

Приведенное значение активного сопротивления вторичной обмотки определяется из условия, что потери в обмотке остаются без изменений

$$r'_2 = r_2 \cdot k^2$$

Для того, чтобы режим работы трансформатора не изменился, в таком же отношении должно измениться и x_2 .

$$x'_2 = x_2 \cdot k^2$$

Аналогично приводятся активные и реактивные сопротивления нагрузки, включаемой во вторичную обмотку.

Пример №16.

Трехфазный трансформатор ТСЗ-160/6 имеет следующие технические данные: $S_{ном} = 160$ кВА, $U_{1ном} = 6$ кВ, $U_{2ном} = 0,23$ кВ, $P_0 = 0,7$ кВт, $P_k = 2,7$ кВт, $u_k = 5,5\%$, $i_0 = 4\%$. Требуется определить коэффициент трансформации, номинальные значения токов первичной и вторичной обмоток, ток холостого хода и напряжение короткого замыкания, сопротивление короткого замыкания, его активную и реактивную составляющие, номинальные изменения напряжения при $\cos \varphi_2 = 1$; $\cos \varphi_2 = 0,8$ (инд.); $\cos \varphi_2 = 0,8$ (емк.). Построить внешние характеристики трансформатора при $\cos \varphi_2 = 1$; $\cos \varphi_2 = 0,8$ (инд.); $\cos \varphi_2 = 0,8$ (емк.).

Решение:

1. Коэффициент трансформации

$$k = \frac{U_{1ном}}{U_{2ном}} = \frac{6000}{230} = 26$$

2. Номинальный ток первичной обмотки

$$I_{1ном} = \frac{S_{ном}}{\sqrt{3} \cdot U_{1ном}} = \frac{160 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 6 \cdot 10^3} = 15,4 \text{ А}$$

3. Номинальный ток вторичной обмотки

$$I_{2ном} = I_{1ном} \cdot k = 15,4 \cdot 26 = 400 \text{ А}$$

4. Ток холостого хода

$$I_0 = \frac{i_0}{100} \cdot I_{1ном} = \frac{4}{100} \cdot 15,4 = 0,6 \text{ А}$$

5. Напряжение короткого замыкания

$$U_k = \frac{u_k}{100} \cdot U_{1ном} = \frac{5,5}{100} \cdot 6000 = 330 \text{ В}$$

6. Сопротивление короткого замыкания

$$z_k = \frac{U_{1k}}{\sqrt{3} \cdot I_{1ном}} = \frac{330}{\sqrt{3} \cdot 15,4} = 12,4 \text{ Ом}$$

7. Коэффициент мощности короткого замыкания

$$\cos \varphi_k = \frac{P_k}{\sqrt{3} \cdot U_k \cdot I_{1ном}} = \frac{2700}{\sqrt{3} \cdot 330 \cdot 15,4} = 0,307$$

$$\varphi_k = 72^\circ$$

$$\sin \varphi_k = 0,95$$

8. Активная и реактивная составляющие сопротивления короткого замыкания

$$r_k = z_k \cdot \cos \varphi_k = 12,4 \cdot 0,307 = 3,8 \text{ Ом}$$

$$x_k = z_k \cdot \sin \varphi_k = 12,4 \cdot 0,95 = 11,78 \text{ Ом}$$

9. Активная и реактивная составляющие напряжения короткого замыкания

$$u_{к.а} = u_k \cdot \cos \varphi_k = 5,5 \cdot 0,307 = 1,7\%$$

$$u_{к.р} = u_k \cdot \sin \varphi_k = 5,5 \cdot 0,95 = 5,2\%$$

10. Изменение вторичного напряжения трансформатора при номинальной нагрузке ($\beta=1$):

- при коэффициенте мощности $\cos \varphi_2 = 1, \sin \varphi_2 = 0$

$$\Delta U_{ном} = u_{к.а} \cdot \cos \varphi_2 + u_{к.р} \cdot \sin \varphi_2 = 1,7 \cdot 1 + 5,2 \cdot 0 = 1,7\%$$

- при коэффициенте мощности $\cos \varphi_2 = 0,8$ (инд.), $\sin \varphi_2 = 0,6$

$$\Delta U_{ном} = u_{к.а} \cdot \cos \varphi_2 + u_{к.р} \cdot \sin \varphi_2 = 1,7 \cdot 0,8 + 5,2 \cdot 0,6 = 4,48\%$$

- при коэффициенте мощности $\cos \varphi_2 = 0,8$ (емк.), $\sin \varphi_2 = 0,6$

$$\Delta U_{ном} = u_{к.а} \cdot \cos \varphi_2 + u_{к.р} \cdot \sin \varphi_2 = 1,7 \cdot 0,8 + 5,2 \cdot (-0,6) = -1,76\%$$

Результаты расчета изменения вторичного напряжения трансформатора $\Delta U_{ном}$ при номинальной нагрузке сводим в таблицу 18.

Таблица 22.

$\cos \varphi_2$	1	0,8 (инд)	0,8 (емк)
$\Delta U_{ном}, \%$	1,7	4,48	-1,76
$\Delta U_{ном}, \text{В}$	3,91	10,3	-4,05
$U_2 = U_{2ном} - \Delta U_{ном}, \text{В}$	226	220	234

По полученным данным строим внешние характеристики (рис.16)

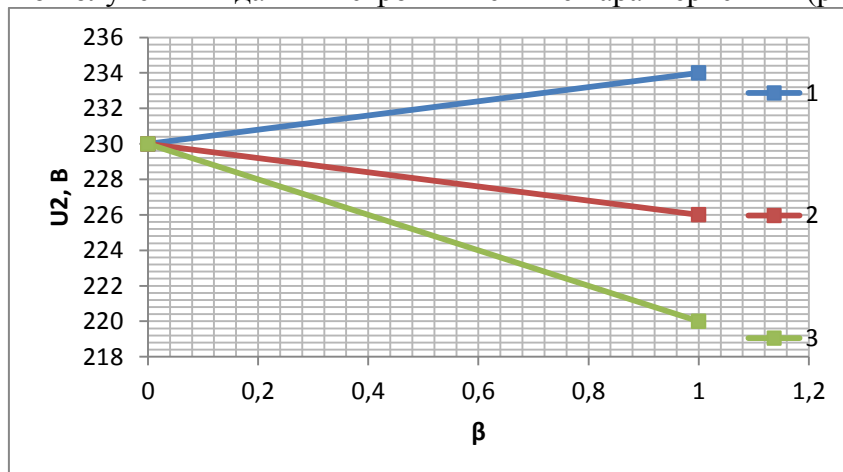


Рисунок 16. Внешние характеристики трансформатора (1- $\cos \varphi_2 = 0,8$ (емк.), 2 - $\cos \varphi_2 = 1$, 3 - $\cos \varphi_2 = 0,8$ (инд.)).

Расчетно-графическое задание № 12.

Тема: «Расчет параметров трансформатора»

Задание:

Трехфазный трансформатор имеет данные, указанные в таблицах 23-24.

Требуется:

Определить:

1. Коэффициент трансформации.

2. Номинальные значения токов первичной и вторичной обмоток.
3. Ток холостого хода и напряжение короткого замыкания.
4. Сопротивление короткого замыкания, его активную и реактивную составляющие.
5. Номинальные изменения напряжения при $\cos \varphi = 1$; $\cos \varphi = 0,8$ (инд.); $\cos \varphi = 0,8$ (емк.).

Построить:

Внешние характеристики трансформатора $\cos \varphi = 1$; $\cos \varphi = 0,8$ (инд.); $\cos \varphi = 0,8$ (емк.).

Таблица 23 (по второй цифре)

Наименование величин	Варианты									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$S_{ном}$, кВА	20	50	100	180	180	320	560	1000	1800	3200
$U_{1ном}$, кВ	6	3	6	10	31,5	10	35	35	35	10
$U_{2ном}$, кВ	0,23	0,525	0,4	0,525	0,4	0,4	6,3	6,3	10,5	6,3
P_0 , Вт	180	350	600	1000	1500	1900	3350	5100	8300	11000
P_K , Вт	600	1325	2400	4000	4100	6200	9400	15000	24000	37000

Таблица 24 (по третьей цифре)

Наименование величин	Варианты									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
u_K , %	5,5	5,5	5,5	5,5	6,5	5,5	6,5	6,5	6,5	5,5
i_0 , %	9	7	6,5	6	8	7	6,5	5,5	5	4

4. Схема замещения и КПД трансформатора

Для уравнений приведенного трансформатора в установившемся режиме работы может быть составлена электрическая схема замещения, когда магнитная связь между обмотками заменяется электрической, что значительно упрощает расчет и анализ работы трансформатора. В этом случае ток $\dot{I}_1$ представляется состоящим из двух составляющих: первая $\dot{I}_0$ – идет на создание основного магнитного потока; вторая, равная току во вторичной обмотке с обратным знаком ($-\dot{I}'_2$), на компенсацию размагничивающего влияния вторичной обмотки. Трансформатор можно изобразить в виде электрических схем замещения. На рис.18 представлена Т-образная схема замещения трансформатора.

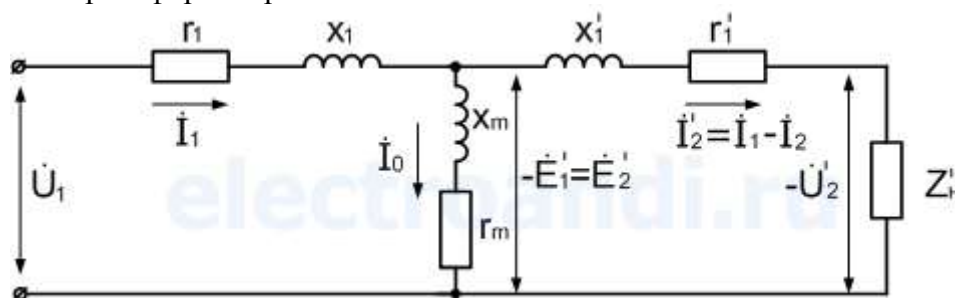


Рисунок 18. Т-образная схема замещения трансформатора

КПД трансформатора при любой нагрузке определяется выражением

$$\eta = \frac{\beta \cdot S_{ном} \cdot \cos \varphi_2}{\beta \cdot S_{ном} \cdot \cos \varphi_2 + P_{0ном} + \beta^2 \cdot P_{K.ном}}$$

Наибольшее значение КПД соответствует коэффициенту нагрузки

$$\beta' = \sqrt{\frac{P_{0ном}}{P_{K.ном}}}$$

который обычно составляет $0,45 \div 0,65$.

Максимальный КПД равен

$$\eta_{max} = \frac{\beta' \cdot S_{ном} \cdot \cos \varphi_2}{\beta' \cdot S_{ном} \cdot \cos \varphi_2 + 2 \cdot P_{0ном}}$$

Пример №17.

Трехфазный трансформатор имеет следующие параметры: номинальная мощность $S_{ном} = 100$ кВА, номинальные напряжения (линейные) $U_{1ном} = 0,5$ кВ, $U_{2ном} = 0,23$ кВ, напряжение короткого замыкания $u_k = 5,5\%$, мощность короткого замыкания $P_{к.ном} = 2$ кВт, мощность холостого хода $P_{0ном} = 0,65$ кВт, ток холостого хода $i_0 = 6,5\%$. Обмотки соединены по схеме Y/Y.

Требуется определить: параметры Т-образной схемы замещения, считая ее симметричной ($r_1 = r'_2$ и $x_1 = x'_2$), а так же фактические сопротивления вторичной обмотки; величины КПД, соответствующие значениям полной мощности трансформатора $0,25 S_{ном}$; $0,5 S_{ном}$; $0,75 S_{ном}$ и $S_{ном}$ при коэффициентах мощности нагрузки $\cos \varphi_2 = 0,8$ (индуктивный характер нагрузки) и $\cos \varphi_2 = 1$; номинальные изменения напряжения $\Delta U_{ном}$. Построить графики $\eta = f(\beta)$ и $U_2 = f(\beta)$. Определить величину снижения КПД при номинальной нагрузке по сравнению с его максимальным значением при $\cos \varphi_2 = 0,8$.

Решение:

- 1) Напряжение короткого замыкания

$$U_{1к} = \frac{u_k}{100} \cdot U_{1ном} = \frac{5,5}{100} \cdot 500 = 27,5 \text{ В}$$

- 2) Ток короткого замыкания

$$I_{1к} = I_{1ном} = \frac{S_{ном}}{\sqrt{3} \cdot U_{1ном}} = \frac{100 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 500} = 115,5 \text{ А}$$

- 3) Коэффициент мощности в режиме короткого замыкания

$$\cos \varphi_k = \frac{P_{к.ном}}{\sqrt{3} \cdot U_{1к} \cdot I_{1к}} = \frac{2000}{\sqrt{3} \cdot 27,5 \cdot 115,5} = 0,364$$
$$\varphi_k = 68^\circ$$
$$\sin \varphi_k = 0,932$$

- 4) Полное сопротивление короткого замыкания

$$z_k = \frac{U_{1к}}{\sqrt{3} \cdot I_{1к}} = \frac{27,5}{\sqrt{3} \cdot 115,5} = 0,138 \text{ Ом}$$

- 5) Активная и индуктивная составляющие сопротивления короткого замыкания

$$r_k = z_k \cdot \cos \varphi_k = 0,138 \cdot 0,364 = 0,05 \text{ Ом}$$

$$x_k = z_k \cdot \sin \varphi_k = 0,138 \cdot 0,932 = 0,12 \text{ Ом}$$

- 6) Коэффициент трансформации

$$k = \frac{U_{1ном}}{U_{2ном}} = \frac{500}{230} = 2,17$$

- 7) Активная и индуктивная составляющие сопротивления Т-образной схемы замещения (рис.16)

$$r_1 = r'_2 = \frac{0,05}{2} = 0,025 \text{ Ом}$$

$$x_1 = x'_2 = \frac{0,12}{2} = 0,06 \text{ Ом}$$

- 8) Фактические значения сопротивлений вторичной обмотки трансформатора

$$r_2 = \frac{r'_2}{k^2} = \frac{0,025}{2,17^2} = 0,005 \text{ Ом}$$

$$x_2 = \frac{x'_2}{k^2} = \frac{0,06}{2,17^2} = 0,013 \text{ Ом}$$

- 9) Ток холостого хода

$$I_{0ном} = \frac{i_0}{100} \cdot I_{1ном} = \frac{6,5}{100} \cdot 115,5 = 7,5 \text{ А}$$

- 10) Коэффициент мощности в режиме холостого хода

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_{0ном}}{\sqrt{3} \cdot I_{0ном} \cdot U_{1ном}} = \frac{650}{\sqrt{3} \cdot 7,5 \cdot 500} = 0,1$$
$$\varphi_0 = 84^\circ$$

$$\sin \varphi_0 = 0,995$$

11) Полное сопротивление ветви намагничивания Т-образной схемы замещения трансформатора

$$z_m = \frac{U_{1\text{НОМ}}}{\sqrt{3} \cdot I_{0\text{НОМ}}} = \frac{500}{\sqrt{3} \cdot 7,5} = 38,5 \text{ Ом}$$

12) Активная и индуктивная составляющие ветви намагничивания

$$r_m = z_m \cdot \cos \varphi_0 = 38,5 \cdot 0,1 = 3,85 \text{ Ом}$$

$$x_m = z_m \cdot \sin \varphi_0 = 38,5 \cdot 0,995 = 38,3 \text{ Ом}$$

13) Для расчета КПД воспользуемся формулой

$$\eta = \frac{\beta \cdot S_{\text{НОМ}} \cdot \cos \varphi_2}{\beta \cdot S_{\text{НОМ}} \cdot \cos \varphi_2 + P_{0\text{НОМ}} + \beta^2 \cdot P_{\text{к.НОМ}}}$$

Результаты расчета сведены в таблице 24.

Таблица 24.

β	0,25	0,5	0,75	1
η (при $\cos \varphi_2 = 1$)	0,970	0,978	0,977	0,974
η (при $\cos \varphi_2 = 0,8$ инд)	0,963	0,972	0,971	0,968

14) Коэффициент нагрузки, соответствующий максимальному КПД

$$\beta' = \sqrt{\frac{P_{0\text{НОМ}}}{P_{\text{к.НОМ}}}} = \sqrt{\frac{650}{2000}} = 0,57$$

15) Максимальные значения КПД:

- при $\cos \varphi_2 = 1$

$$\eta_{\text{max}} = \frac{\beta' \cdot S_{\text{НОМ}} \cdot \cos \varphi_2}{\beta' \cdot S_{\text{НОМ}} \cdot \cos \varphi_2 + 2 \cdot P_{0\text{НОМ}}} = \frac{0,57 \cdot 100 \cdot 10^3 \cdot 1}{0,57 \cdot 100 \cdot 10^3 \cdot 1 + 2 \cdot 650} = 0,978$$

- при $\cos \varphi_2 = 0,8$ (инд)

$$\eta_{\text{max}} = \frac{\beta' \cdot S_{\text{НОМ}} \cdot \cos \varphi_2}{\beta' \cdot S_{\text{НОМ}} \cdot \cos \varphi_2 + 2 \cdot P_{0\text{НОМ}}} = \frac{0,57 \cdot 100 \cdot 10^3 \cdot 0,8}{0,57 \cdot 100 \cdot 10^3 \cdot 0,8 + 2 \cdot 650} = 0,972$$

Зависимость $\eta = f(\beta)$ представлена на рис.19.

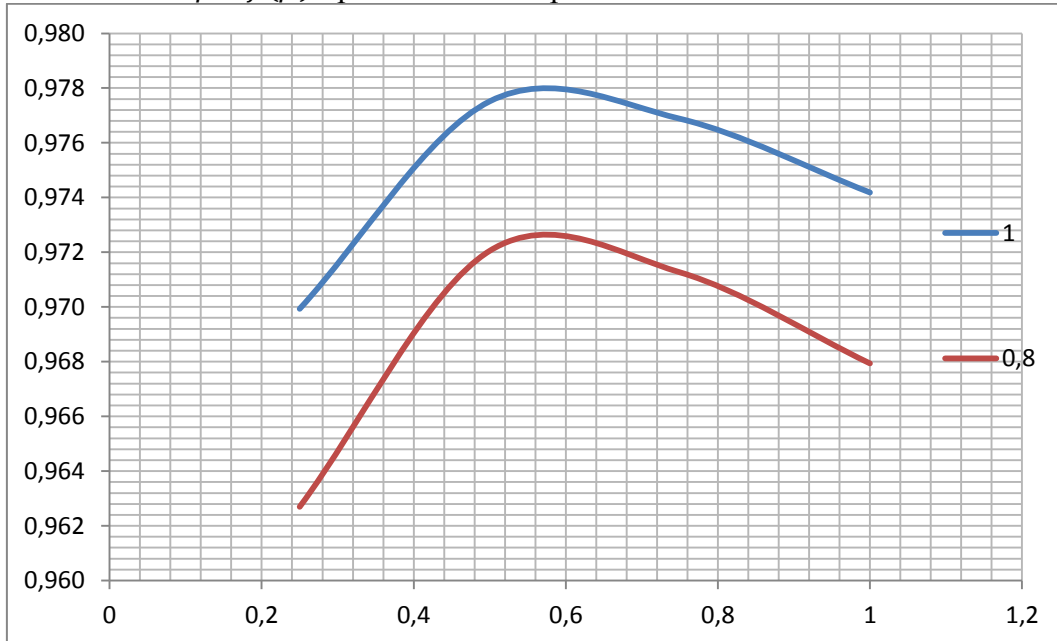


Рисунок 19. Зависимость $\eta = f(\beta)$

16) Активная и реактивная составляющие напряжения короткого замыкания

$$u_{\text{ка}} = u_{\text{к}} \cdot \cos \varphi_{\text{к}} = 5,5 \cdot 0,364 = 2\%$$

$$u_{\text{кр}} = u_{\text{к}} \cdot \sin \varphi_{\text{к}} = 5,5 \cdot 0,932 = 5,13\%$$

- 17) Для расчета номинального изменения напряжения воспользуемся выражением

$$\Delta U_{\text{НОМ}} = \beta \cdot (u_{\text{ка}} \cdot \cos \varphi_2 + u_{\text{кр}} \cdot \sin \varphi_2)$$

При $\cos \varphi_2 = 1, \sin \varphi_2 = 0$

$$\Delta U_{\text{НОМ}} = 2 \cdot 1 + 5,13 \cdot 0 = 2\%$$

При $\cos \varphi_2 = 0,8, \sin \varphi_2 = 0,6$

$$\Delta U_{\text{НОМ}} = 2 \cdot 0,8 + 5,13 \cdot 0,6 = 4,68\%$$

Результаты расчета изменения вторичного напряжения трансформатора $\Delta U_{\text{НОМ}}$ при номинальной нагрузке сводим в таблицу 25.

Таблица 25.

$\cos \varphi_2$	1	0,8 (инд)
$\Delta U_{\text{НОМ}}, \%$	2	4,68
$\Delta U_{\text{НОМ}}, \text{В}$	4,6	10,8
$U_2 = U_{2\text{НОМ}} - \Delta U_{\text{НОМ}}, \text{В}$	225,4	219,2

Зависимость $U_2 = f(\beta)$ представлена на рис.20.

- 18) Активная мощность, поступающая из сети

$$P_{1\text{НОМ}} = S_{\text{НОМ}} \cdot \cos \varphi_2 = 100 \cdot 10^3 \cdot 0,8 = 80 \cdot 10^3 \text{ Вт}$$

- 19) Активная мощность на выходе вторичной обмотки

$$P_{\text{НОМ}} = P_{1\text{НОМ}} - (P_{0\text{НОМ}} + P_{\text{к.НОМ}}) = 80 \cdot 10^3 - (650 + 2000) = 77350 \text{ Вт}$$

- 20) КПД в номинальном режиме

$$\eta_{\text{НОМ}} = \frac{P_{\text{НОМ}}}{P_{1\text{НОМ}}} = \frac{77350}{80000} = 0,967$$

- 21) Максимальный КПД

$$\eta_{\text{max}} = \frac{\beta' \cdot S_{\text{НОМ}} \cdot \cos \varphi_2}{\beta' \cdot S_{\text{НОМ}} \cdot \cos \varphi_2 + 2 \cdot P_{0\text{НОМ}}} = \frac{0,57 \cdot 100 \cdot 10^3 \cdot 0,8}{0,57 \cdot 100 \cdot 10^3 \cdot 0,8 + 2 \cdot 650} = 0,972$$

- 22) Снижение КПД трансформатора при номинальной нагрузке

$$0,972 - 0,967 = 0,005, \text{ т.е. } 0,5\%$$

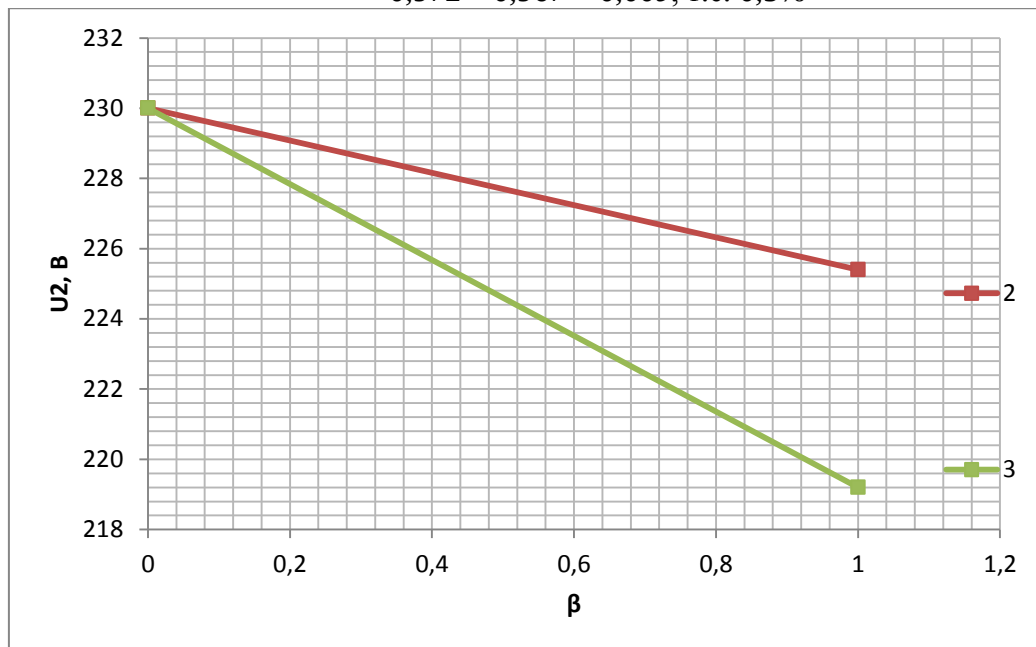


Рисунок 20. Зависимость $U_2 = f(\beta)$

Расчетно-графическое задание № 13.

Тема: «Схема замещения и КПД трансформатора»

Задание:

Трехфазный трансформатор имеет данные, указанные в таблице 26.

Требуется:

Определить:

- параметры Т-образной схемы замещения, считая ее симметричной ($r_1 = r'_2$ и $x_1 = x'_2$);
- фактические сопротивления вторичной обмотки;
- величины КПД, соответствующие значениям полной мощности трансформатора $0,25 S_{ном}$; $0,5 S_{ном}$; $0,75 S_{ном}$ и $S_{ном}$ при коэффициентах мощности нагрузки $\cos \varphi_2 = 0,8$ (индуктивный характер нагрузки) и $\cos \varphi_2 = 1$;
- номинальные изменения напряжения $\Delta U_{ном}$;
- величину снижения КПД при номинальной нагрузке по сравнению с его максимальным значением при заданном $\cos \varphi_2$.

Построить графики $\eta = f(\beta)$ и $U_2 = f(\beta)$.

Таблица 26 (по третьей цифре).

наименован величины	вариант									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$S_{ном}$, кВА	180	320	560	1000	800	600	700	400	200	160
$U_{1ном}$, кВ	3	6	10	35	10	10	6	3	3	10
$U_{2ном}$, кВ	0,4	0,4	0,4	3	0,4	0,6	0,6	0,23	0,23	0,4
$P_{к.ном}$, кВт	3,6	5,8	9	13,5	10	9	8,2	6	4	2,7
$P_{0ном}$, кВт	1,2	1,6	2,5	5,2	3,6	2,8	3,2	2	1,5	0,7
$u_{к\%}$	5,5	8,5	6,5	5,5	6,5	8,5	5,5	6,5	5,5	5,5
$i_0, \%$	5,5	5,5	5,5	5	5	5,5	5,5	5,5	6,5	4
$\cos \varphi_2$	0,85	0,85	0,8	0,75	0,7	0,8	0,75	0,85	0,8	0,8

5. Параллельная работа трансформаторов

Параллельной работой трансформаторов называется такое их соединение, когда первичные обмотки включены на общую первичную сеть, а вторичные – на общую вторичную сеть.

Параллельная работа трансформаторов необходима по тем же причинам, что и параллельная работа генераторов: обеспечение резервирования в случае аварии или ремонта трансформаторов и повышение экономичности в работе (при спаде нагрузки часть трансформаторов отключается).

Параллельно включённые трансформаторы работают наилучшим образом, если выполняются следующие условия, называемые условиями параллельной работы:

1. Коэффициенты трансформации параллельно работающих трансформаторов должны быть равны $k_I = k_{II} = \dots = k_N$
2. Трансформаторы должны принадлежать к одной группе.
3. Напряжение короткого замыкания параллельно работающих трансформаторов должны быть одинаковыми $u_{кI} = u_{кII} = \dots = u_{кN}$

Если эти условия выполнены, то при включении первичных обмоток на общие шины всегда можно найти такие зажимы вторичных обмоток, которые имеют одинаковые потенциалы и, соединив их между собой осуществить параллельную работу трансформаторов.

Пример №18.

Два трансформатора, имеющие следующие данные: $S_{нI} = 600$ кВА, $u_{кI} = 6\%$ и $S_{нII} = 800$ кВА, $u_{кII} = 5,5\%$ включены на параллельную работу и передают суммарную нагрузку, равную $S_I + S_{II} = 1200$ кВА.

Требуется определить нагрузку каждого трансформатора и какую предельно-допустимую нагрузку они могут передавать и как она распределяется между ними.

Решение:

- 1) Распределение нагрузки между параллельно работающими трансформаторами определяется из соотношения

$$\frac{S_I}{S_{нI}} : \frac{S_{II}}{S_{нII}} = \frac{1}{u_{кI}} : \frac{1}{u_{кII}} \text{ или } \frac{S_I \cdot S_{нII}}{S_{II} \cdot S_{нI}} = \frac{u_{кII}}{u_{кI}}$$

Отсюда

$$S_I = \frac{u_{кII} \cdot S_{нI}}{u_{кI} \cdot S_{нII}} \cdot S_{II} = \frac{5,5 \cdot 600}{6 \cdot 800} \cdot S_{II} = 0,6875 \cdot S_{II}$$

$$\begin{aligned}
S_I + S_{II} &= 1200 \\
0,6875 \cdot S_{II} + S_{II} &= 1200 \\
(0,6875 + 1) \cdot S_{II} &= 1200 \\
S_{II} &= \frac{1200}{1,6875} = 711 \text{ кВА} \\
S_I &= 1200 - S_{II} = 1200 - 711 = 489 \text{ кВА}
\end{aligned}$$

В процентах от номинальной мощности

$$\begin{aligned}
\frac{S_I}{S_{нI}} \cdot 100 &= \frac{489}{600} \cdot 100 = 81,5\% \\
\frac{S_{II}}{S_{нII}} \cdot 100 &= \frac{711}{800} \cdot 100 = 89\%
\end{aligned}$$

2) Так как $u_{кII} < u_{кI}$, то второй трансформатор нагружается больше. Предельно-допустимая нагрузка трансформатора равна номинальной. Следовательно, $S_{II} = S_{нII}$. Тогда

$$\begin{aligned}
\frac{S_I}{S_{нI}} : 1 &= \frac{1}{u_{кI}} : \frac{1}{u_{кII}} \\
\frac{S_I}{S_{нI}} &= \frac{u_{кII}}{u_{кI}}
\end{aligned}$$

Отсюда

$$S_I = \frac{u_{кII}}{u_{кI}} \cdot S_{нI} = \frac{5,5}{6} \cdot 600 = 550 \text{ кВА}$$

Предельно-допустимая нагрузка равна

$$S_I + S_{нII} = 800 + 550 = 1350 \text{ кВА}$$

Расчетно-графическое задание № 14.

Тема: «**Параллельная работа трансформаторов**»

Задание:

Трехфазные трансформаторы включены на параллельную работу. Параметры трансформаторов приведены в таблицах 27,28.

Требуется:

Определить:

1. Нагрузку каждого трансформатора, если общая нагрузка параллельно работающих трансформаторов равна сумме их номинальных мощностей;
2. Степень использования каждого трансформатора по мощности;
3. Предельно-допустимую нагрузку трансформаторов.

Таблица 27 (по второй цифре)

Наименование величин	Варианты									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$S_{нI}$, кВА	20	50	100	180	180	320	560	1000	1800	3200
$S_{нII}$, кВА	16	36	78	164	150	300	480	800	1780	2800

Таблица 28 (по третьей цифре)

Наименование величин	Варианты									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$u_{кI}$, %	5,5	4,3	4,4	5,3	6,5	4,0	6,2	4,0	4,0	4,2
$u_{кII}$, %	5,3	4,0	4,0	5,5	6,2	4,3	6,5	4,4	4,2	4,0

Тема 1.3. Машины переменного тока

1. Обмотки машин переменного тока

В зависимости от числа фаз обмотки выполняются однофазными, двухфазными и трехфазными. Трехфазная обмотка состоит из трех одинаковых фазных обмоток, сдвинутых в

пространстве друг относительно друга на $1/3$ двойного полюсного деления или на 120 электрических градусов.

По способу выполнения обмотки различают как однослойные, так и двухслойные обмотки. Преимущественное применение получают двухслойные обмотки. В машинах мощностью 10 кВт и меньше часто применяются однослойные обмотки.

Пример №19.

Начертить развернутую схему однослойной обмотки: $m = 3$, $2p = 4$, $q = 2$.

Решение:

- 1) Число пазов

$$Z = 2p \cdot m \cdot q = 4 \cdot 3 \cdot 2 = 24$$

- 2) Угол сдвига между соседними пазами

$$\gamma = \frac{p \cdot 360}{Z} = \frac{2 \cdot 360}{24} = 30^\circ$$

- 3) Строим звезду пазовых ЭДС (рис.21)

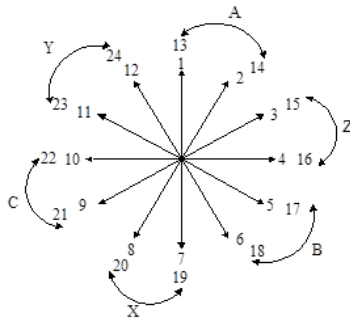


Рисунок 21. Звезда пазовых ЭДС

- 4) Строим схему обмотки (рис.22)

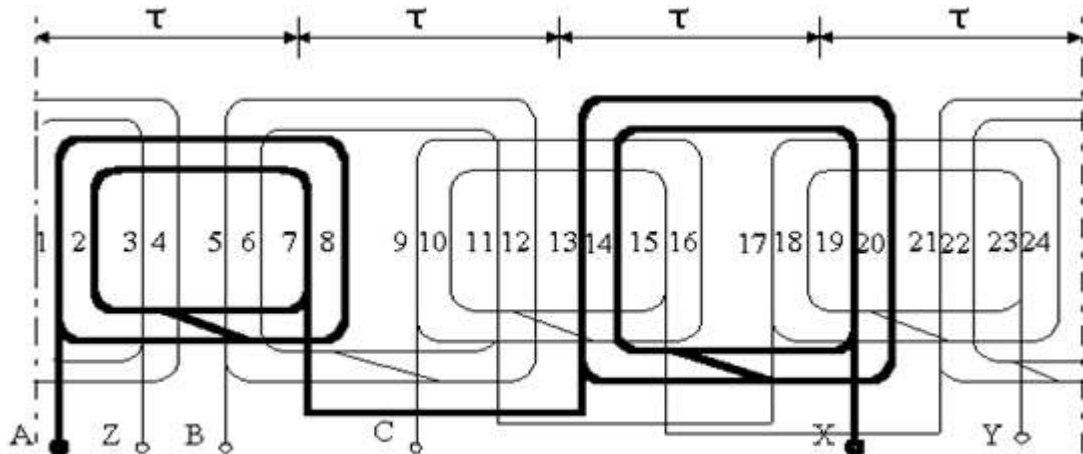


Рисунок 22. Схема однослойной обмотки

Пример №20.

Начертить развернутую схему двухслойной обмотки: $m = 3$, $2p = 4$, $q = 2$.

Решение:

- 1) Число пазов

$$Z = 2p \cdot m \cdot q = 4 \cdot 3 \cdot 2 = 24$$

- 2) Угол сдвига между соседними пазами

$$\gamma = \frac{p \cdot 360}{Z} = \frac{2 \cdot 360}{24} = 30^\circ$$

- 3) Полюсное деление

$$\tau = \frac{Z}{2p} = \frac{24}{4} = 6$$

4) Выбираем шаг обмотки

$$y = \frac{5}{6} \cdot \tau = \frac{5}{6} \cdot 6 = 5$$

5) Строим звезду пазовых ЭДС (рис.21)

6) Строим схему обмотки (рис.23)

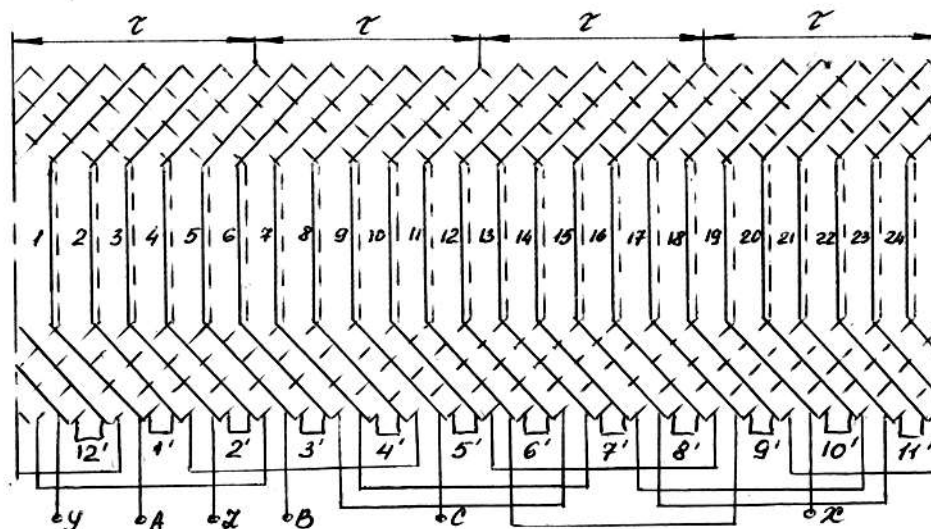


Рисунок 23. Схема двухслойной обмотки

Расчетно-графическое задание № 15.

Тема: «Обмотки машин переменного тока».

Задание:

Трехфазная обмотка имеет данные, указанные в таблице 29.

Требуется:

Начертить развернутую схему однослойной и двухслойной обмоток. На схеме показать соединение фаз обмотки: в однослойной обмотке – «звезда», в двухслойной – «треугольник».

Таблица 29 (по третьей цифре варианта).

Наименование величин	Варианты									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$2p$	8	6	4	4	4	4	8	6	4	4
Z	48	36	36	36	36	36	72	72	60	60
y (шаг по пазам)	5	5	7	7	7	7	7	10	12	12

2. Расчет параметров асинхронных машин

Асинхронная машина в основном используется в качестве двигателя. Поскольку ротор и магнитное поле асинхронной машины вращаются не синхронно, то для анализа работы используют понятие скольжения. При неподвижном роторе асинхронная машина представляет собой трансформатор. Для удобства обмотки ротора “приводят” к статорным. Это позволяет использовать схемы замещения и векторные диаграммы, что упрощает анализ и расчёт установившихся режимов работы. При анализе работы асинхронных машин скорость вращения ротора обычно оценивают величиной, которая называется скольжением

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} \text{ или } s = \frac{n_1 - n}{n_1} \cdot 100\%$$

Пример № 21.

Трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором 4А100S2У3 имеет следующие паспортные данные: $P_{ном} = 4$ кВт; $n_{2ном} = 2880$ об/мин; $\eta_{ном} = 86,5\%$; $\cos \varphi_1 = 0,89$; $I_n/I_{ном} = 7,5$; $M_n/M_{ном} = 2$; $M_{max}/M_{ном} = 2,5$; $U_1 = 220/380$ В.

Требуется определить высоту оси вращения, число полюсов, скольжение при номинальной нагрузке, момент на валу, начальный пусковой и максимальный моменты, потребляемую двигателем из сети активную мощность, суммарные потери при номинальной нагрузке, номинальный ток в питающей сети при соединении обмоток статора «звездой» и «треугольником».

Решение:

- 1) В обозначении типоразмера двигателя цифры, стоящие после обозначения серии 4А, указывают на высоту оси вращения, следовательно $h = 100$ мм.
- 2) Следующая далее цифра указывает на число полюсов, т.е. $2p = 2$.
- 3) Синхронная частота вращения

$$n_1 = \frac{60 \cdot f_1}{p} = \frac{60 \cdot 50}{1} = 3000 \text{ об/мин}$$

- 4) Скольжение при номинальном моменте нагрузки

$$s_{ном} = \frac{n_1 - n_{ном}}{n_1} = \frac{3000 - 2880}{3000} = 0,04 \text{ или } 4\%$$

- 5) Момент на валу двигателя при номинальной нагрузке

$$M_2 = 9,55 \cdot \frac{P_{ном}}{n_{2ном}} = 9,55 \cdot \frac{4 \cdot 10^3}{2880} = 13,26 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

- 6) Начальный пусковой момент

$$M_{п} = M_{ном} \cdot \left(\frac{M_{п}}{M_{ном}} \right) = 13,26 \cdot 2 = 26,52 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

- 7) Максимальный момент двигателя

$$M_{max} = M_{ном} \cdot \left(\frac{M_{max}}{M_{ном}} \right) = 13,26 \cdot 2,5 = 33,16 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

- 8) Номинальный ток в фазной обмотке статора

$$I_{1ном} = \frac{P_{ном}}{m_1 \cdot U_1 \cdot \eta_{ном} \cdot \cos \varphi_{1ном}} = \frac{4000}{3 \cdot 220 \cdot 0,865 \cdot 0,89} = 7,9 \text{ А}$$

- 9) Потребляемая двигателем из сети активная мощность в режиме номинальной нагрузки

$$P_{1ном} = \frac{P_{ном}}{\eta_{ном}} = \frac{4000}{0,865} = 4624 \text{ Вт}$$

- 10) Суммарные потери в двигателе при номинальной нагрузке

$$\Sigma p = P_{1ном} - P_{ном} = 4624 - 4000 = 624 \text{ Вт}$$

- 11) Линейный ток статора:

- при соединении обмоток «звездой»

$$I_{1\Delta Y} = I_1 = 7,9 \text{ А}$$

- при соединении обмоток «треугольником»

$$I_{1\Delta} = \sqrt{3} \cdot I_1 = \sqrt{3} \cdot 7,9 = 13,7 \text{ А}$$

Расчетно-графическое задание №16.

Тема: «Расчет параметров асинхронных машин»

Задание:

Трехфазный асинхронный двигатель имеет данные, указанные в табл.30.

Требуется:

Определить:

1. Величину скольжения при номинальной нагрузке;
2. Момент на валу двигателя при номинальной нагрузке;
3. Начальный пусковой момент;
4. Критический момент двигателя;
5. Мощность двигателя, потребляемую из сети;

6. Суммарные потери при номинальной нагрузке;
7. Номинальный ток в питающей сети:
 - а) при соединении обмоток статора «звездой»;
 - б) при соединении обмоток статора «треугольником».

Таблица 30 (по третьей цифре)

Наименование величин	варианты									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$P_{ном}, \text{кВт}$	6	15	37	5,5	11	30	22	90	110	110
$U_1, \text{В}$	$\frac{220}{380}$	$\frac{220}{380}$	$\frac{380}{660}$	$\frac{220}{380}$	$\frac{220}{380}$	$\frac{380}{660}$	$\frac{220}{380}$	$\frac{380}{660}$	$\frac{380}{660}$	$\frac{380}{660}$
$\eta_{ном}, \%$	86	88	90	85,5	87,5	91	90	92,5	93	93
$\cos \varphi_1$	0,88	0,91	0,89	0,85	0,87	0,89	0,9	0,89	0,85	0,83
$I_n/I_{ном}$	7	7	7,5	7	7,5	6,5	6,5	5,5	6,5	6
$M_n/M_{ном}$	1,5	1,4	1,4	2	2,2	1,4	1,3	1,4	1,2	1
$M_{max}/M_{ном}$	2	2,2	2,5	2,2	3	2,3	2,4	2,2	2,3	1,8
$n_{2ном}, \text{об/мин}$	2900	2940	2945	1445	1460	1470	975	985	740	690
$2p$	2	2	2	4	4	4	6	6	8	8

3. Потери и КПД асинхронных машин

Энергетическая диаграмма асинхронного двигателя представлена на рис.24.

Асинхронный двигатель потребляет из сети активную мощность

$$P_1 = m \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1$$

Часть этой мощности теряется в виде электрических потерь в активном сопротивлении обмотки статора

$$p_{эл1} = m_1 \cdot r_1 \cdot I_1^2$$

Часть мощности расходуется на потери в стали сердечника ротора

$$p_c = m_1 \cdot r_m \cdot I_m^2$$

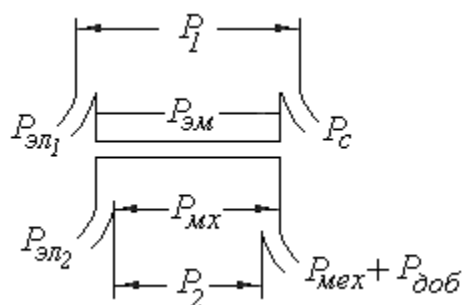


Рисунок 24. Энергетическая диаграмма АД

Оставшаяся часть мощности передается через воздушный зазор на ротор и называется электромагнитной мощностью

$$P_{эм} = P_1 - p_{эл1} - p_c$$

Эта мощность за вычетом потерь в активном сопротивлении обмотки ротора преобразуется в механическую мощность

$$P_{мх} = P_{эм} - p_{эл2}$$

Часть механической мощности теряется внутри двигателя в виде механических потерь $p_{мех}$. Это потери на трение в подшипниках, вентиляцию. Здесь же необходимо учесть другие неучтенные потери, которые называются добавочными $p_{доб}$.

Полезная мощность на валу равна

$$P_2 = P_{мх} - p_{мех} - p_{доб}$$

Пример № 22.

Трехфазный асинхронный двигатель с числом полюсов $2p=4$ включен в сеть напряжением 380 В, частотой 50 Гц при соединении обмотки статора «треугольником». Мощность двигателя $P_{2ном}=3$ кВт, КПД $\eta_{ном}=81,5\%$, коэффициент мощности $\cos \varphi_1=0,76$, скольжение при номинальной нагрузке $s_{ном}=5,5\%$. При нагрузке $P_2=0,85P_{2ном}$ к.п.д. двигателя имеет наибольшее значение $\eta_{max}=1,03\eta_{ном}$.

Требуется определить все остальные виды потерь двигателя для режима номинальной нагрузки.

Решение:

- 1) Наибольшее значение КПД

$$\eta_{max} = 1,03 \cdot \eta_{ном} = 1,03 \cdot 0,815 = 0,84$$

- 2) Нагрузка двигателя при наибольшем КПД

$$P_2 = 0,85 \cdot P_{2ном} = 0,85 \cdot 3000 = 2550 \text{ Вт}$$

- 3) Потребляемая мощность при наибольшем КПД

$$P_1 = \frac{P_2}{\eta_{max}} = \frac{2550}{0,84} = 3036 \text{ Вт}$$

- 4) Суммарные потери при наибольшем КПД

$$\Sigma p = P_1 - P_2 = 3036 - 2550 = 486 \text{ Вт}$$

- 5) Постоянные потери двигателя

$$p_{пост} = p_c + p_{мех} = 0,5 \cdot \Sigma p = 0,5 \cdot 486 = 243 \text{ Вт}$$

- 6) Потребляемая мощность в номинальном режиме

$$P_{1ном} = \frac{P_{2ном}}{\eta_{ном}} = \frac{3000}{0,815} = 3681 \text{ Вт}$$

- 7) Суммарные потери в номинальном режиме

$$\Sigma p_{ном} = P_{1ном} - P_{2ном} = 3681 - 3000 = 681 \text{ Вт}$$

- 8) Переменные потери в номинальном режиме

$$p_{пер} = p_{эл} + p_{доб} = \Sigma p_{ном} - p_{пост} = 681 - 243 = 438 \text{ Вт}$$

- 9) Синхронная частота вращения

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

- 10) Момент в режиме холостого хода

$$M_0 = 9,55 \cdot \frac{p_{пост}}{n_1} = 9,55 \cdot \frac{243}{1500} = 1,55 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

- 11) Номинальная частота вращения

$$n_{ном} = n_1 \cdot (1 - s_{ном}) = 1500 \cdot (1 - 0,055) = 1417,5 \text{ об/мин}$$

- 12) Полезный момент на валу двигателя при номинальной нагрузке

$$M_2 = 9,55 \cdot \frac{P_{2ном}}{n_{ном}} = 9,55 \cdot \frac{3000}{1417,5} = 20,2 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

- 13) Электромагнитный момент при номинальной нагрузке

$$M_{ном} = M_2 + M_0 = 20,2 + 1,55 = 21,75 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

- 14) Номинальное значение электромагнитной мощности

$$P_{эм} = 0,105 \cdot M_{ном} \cdot n_1 = 0,105 \cdot 21,75 \cdot 1500 = 3426 \text{ Вт}$$

- 15) Электрические потери в обмотке ротора

$$p_{эл2} = s_{ном} \cdot P_{эм} = 0,055 \cdot 3426 = 188 \text{ Вт}$$

- 16) Добавочные потери

$$p_{доб} = 0,005 \cdot P_{1ном} = 0,005 \cdot 3681 = 18 \text{ Вт}$$

- 17) Электрические потери в номинальном режиме

$$p_{эл} = p_{пер} - p_{доб} = 438 - 18 = 420 \text{ Вт}$$

- 18) Электрические потери в обмотке статора

$$p_{эл1} = p_{эл} - p_{эл2} = 420 - 188 = 232 \text{ Вт}$$

- 19) Проверка:

$$\Sigma p_{\text{ном}} = p_{\text{пост}} + p_{\text{эл1}} + p_{\text{эл2}} + p_{\text{доб}} = 243 + 232 + 188 + 18 = 681 \text{ Вт}$$

Расчетно-графическое задание №17.

Тема: «Расчет потерь и к.п.д. асинхронных машин»

Задание:

Трехфазный асинхронный двигатель с числом полюсов $2p=4$ включен в сеть напряжением 380 В частотой 50 Гц при соединении обмотки статора «треугольником». В табл.31. приведены параметры двигателя. При нагрузке $P_2=0,85P_{2\text{ном}}$ к.п.д. двигателя имеет наибольшее значение $\eta_{\text{max}}=1,03\eta_{\text{ном}}$.

Требуется:

Определить все остальные виды потерь двигателя для номинального режима.

Таблица 31 (по третьей цифре варианта)

Наименование величин	варианты									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$P_{2\text{ном}}$, кВт	3,5	4	5,5	7,5	11	15	18,5	22	30	37
$\eta_{\text{ном}}$, %	81	82	85	85,5	86	87,5	88	90	90,5	91
$s_{\text{ном}}$, %	5	5	4	3,3	3	3	2,7	2,5	2,3	2
$\cos \varphi_1$	0,81	0,8	0,82	0,84	0,86	0,87	0,89	0,89	0,9	0,9

4. Круговая диаграмма

Основными характеристиками асинхронного двигателя являются рабочие характеристики. Они могут быть определены экспериментально или рассчитаны с помощью круговой диаграммы.

Установлено, что при $U_1 = \text{const}$ и постоянных параметрах $r_1, r_2', x_1, x_2', r_m, x_m$, концом вектора тока $\dot{I}_1$ является окружность, которая с дополнительными построениями называется круговой диаграммой (рис.25).

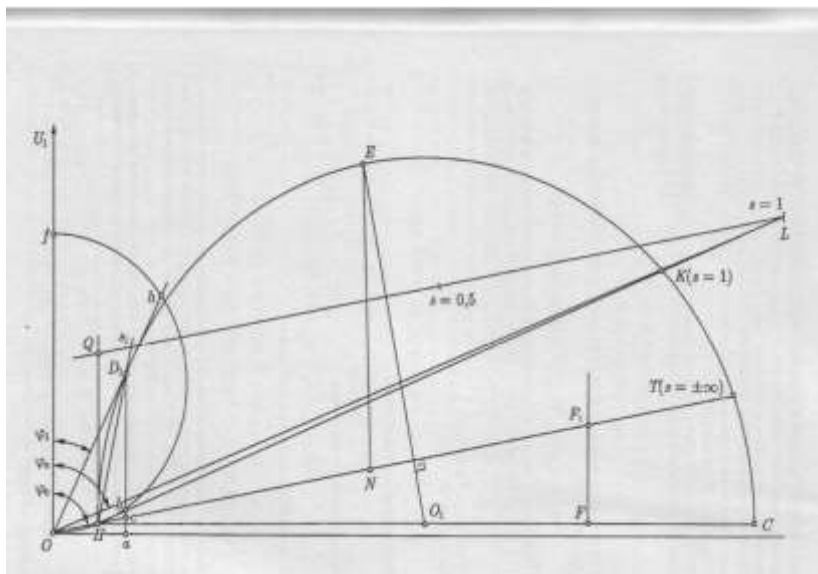


Рисунок 25. Круговая диаграмма

Порядок построения круговой диаграммы:

1. Принимаем масштаб тока m_I , А/мм так, чтобы $D = \frac{U_{1\phi}}{x_k \cdot m_I} = 150 \div 250 \text{ мм}$
2. В прямоугольной системе координат по оси ординат в произвольном масштабе из точки О откладываем вектор напряжения $\dot{U}_1$
3. В масштабе тока m_I откладываем вектор $\dot{I}_0$ под углом φ_0 к $\dot{U}_1$ (отрезок $\overline{OH}$)

4. Через конец вектора $\vec{I}_0$ - (точка Н) проводим прямую, параллельную оси абсцисс
5. На этой прямой в масштабе тока откладываем отрезок $\overline{НС}$, равный диаметру окружности токов D
6. Из точки О1 (середина отрезка $\overline{НС}$) радиусом $\frac{\overline{НС}}{2}$ проводим полуокружность токов.
7. Из точки Н проводим дугу радиусом, соответствующим току короткого замыкания. В месте пересечения этой дуги и полуокружности получаем точку К, называемую точкой короткого замыкания.
8. Соединяем точки Н и К и получаем вектор тока короткого замыкания $\overline{НК}$
9. Из точки О проводим отрезок $\overline{ОД_1}$, соответствующий току $I_{1\phi}$ (точка D_1 лежит на окружности)
10. Находим середину отрезка $\overline{О_1С}$ (точка F)
11. Из точки F восстанавливаем перпендикуляр к $\overline{НС}$. Находим точку F_1 $\overline{FF_1} = \overline{HF} \frac{r_1}{x_k}$
12. Из точки Н через точку F_1 проводим прямую до пересечения с окружностью токов в точке Т. $\overline{НТ}$ - линия электромагнитной мощности
13. Из точки О1 опускаем перпендикуляр на линию $\overline{НТ}$ и продолжаем ее до пересечения с окружностью токов в точке Е
14. Из точки Е опускаем вертикаль до пересечения с $\overline{НТ}$ (точка N). $\overline{ЕН}$ максимальный момент двигателя.
15. На оси ординат радиусом 50 мм проводим полуокружность, проходящую через точку О.
16. Линию $\overline{ОД_1}$ продолжаем до пересечения с полуокружностью в точке h

$$\cos \varphi_1 = \frac{\overline{Oh}}{100}$$

17. Из точки Н параллельно оси ординат проводим линию НQ
18. Из точки Q параллельно линии $\overline{НТ}$ проводим линию до пересечения с $\overline{НК}$ в точке L. Линия QL – шкала скольжения: в точке Н $s=0$, в точке К $s=1$.
19. Продолжим $\overline{НД_1}$ до пересечения с QL, получим s_1 (номинальный режим)

$$n_n = n_1(1 - s_1)$$

Пример № 23.

Построить упрощенную круговую диаграмму трехфазного асинхронного двигателя и определить параметры, соответствующие его номинальному режиму работы. Необходимые для построения диаграммы данные: номинальная мощность $P_{ном} = 3 \text{ кВт}$; напряжение на обмотке статора $U_{1\phi} = 220 \text{ В}$; номинальный ток статора (фазный) $I_{1\phi} = 6,3 \text{ А}$; число полюсов $2p = 4$; активное сопротивление фазной обмотки статора при рабочей температуре $r_1 = 1,7 \text{ Ом}$; ток холостого хода (фазный) $I_{0\phi} = 1,83 \text{ А}$; мощность холостого хода $P_0 = 300 \text{ Вт}$; мощность идеального холостого хода $P'_0 = P_0 - 3 \cdot I_0 \cdot r_1 = 283 \text{ Вт}$; механические потери $p_{мех} = 200 \text{ Вт}$; коэффициент мощности холостого хода $\cos \varphi_0 = 0,24$; мощность короткого замыкания $P_k = 418 \text{ Вт}$; напряжение короткого замыкания (фазное) $U_k = 59,5 \text{ В}$; коэффициент мощности короткого замыкания $\cos \varphi_k = 0,37$; частота тока 50 Гц.

Решение:

- 1) Углы фазового сдвига токов холостого хода и короткого замыкания относительно напряжения $U_{1\phi}$

$$\varphi_0 = \arccos 0,24 = 76^\circ ; \sin \varphi_0 = 0,97$$

$$\varphi_k = \arccos 0,37 = 68^\circ ; \sin \varphi_k = 0,927$$

- 2) Ток короткого замыкания (фазный), приведенный к номинальному напряжению

$$I_{1к} = I_{1\phi} \cdot \frac{U_{1\phi}}{U_k} = 6,3 \cdot \frac{220}{59,5} = 23 \text{ А}$$

- 3) Принимаем масштаб тока $m_i = 0,1 \text{ А/мм}$

- 4) Длина векторов тока:

$$\text{- ток холостого тока } \overline{ОН} = \frac{I_{0\phi}}{m_i} = \frac{1,83}{0,1} = 18,3 \text{ мм}$$

$$\text{- номинальный ток статора } \overline{ОД_1} = \frac{I_{1\phi}}{m_i} = \frac{6,3}{0,1} = 63 \text{ мм}$$

5) Масштабы мощности и момента

$$m_p = m_1 \cdot U_{1\Phi} \cdot m_i = 3 \cdot 220 \cdot 0,1 = 66 \text{ БТ/ММ}$$

$$m_M = 9,55 \cdot \frac{m_p}{n_1} = 9,55 \cdot \frac{66}{1500} = 0,42 \text{ H} \cdot \text{M/MM}$$

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

б) На оси ординат строим вектор $U_{1\phi}$ произвольной длины (рис.26). Под углом φ_0 к нему строим вектор тока холостого хода $\overline{O\dot{N}}$.

7) Из точки Н параллельно оси абсцисс проводим прямую, на которой откладываем отрезок $\overline{НС}$, равный диаметру окружности токов

$$D_i = \frac{U_{1\phi}/x_K}{m_i} = \frac{220/8,755}{0,1} = 251 \text{ мм}$$

$$x_K = z_K \cdot \sin \varphi_K = \frac{U_K}{I_{1\phi}} \cdot \sin \varphi_K = \frac{59,5}{6,3} \cdot 0,927 = 8,755 \text{ Ом}$$

8) Из точки О1 (середина отрезка $\overline{HC}$) радиусом $\frac{\overline{HC}}{2}$ проводим полуокружность токов.

9) Из точки Н проводим дугу радиусом, соответствующим току короткого замыкания. В месте пересечения этой дуги и полуокружности получаем точку К, называемую точкой короткого замыкания.

10) Соединяем точки Н и К и получаем вектор тока короткого замыкания $\overline{HK}$

11) Из точки O проводим отрезок $\overline{OD_1}$, соответствующий току $I_{1\phi}$ (точка D_1 лежит на окружности)

12) Находим середину отрезка $\overline{O_1C}$ (точка F)

13) Из точки F восстанавливаем перпендикуляр к $\overline{HC}$. Находим точку F₁

$$\overline{FF_1} = \overline{HF} \frac{r_1}{x_k} = 188,25 \cdot \frac{1,7}{8,755} = 36,6 \text{ мм}$$

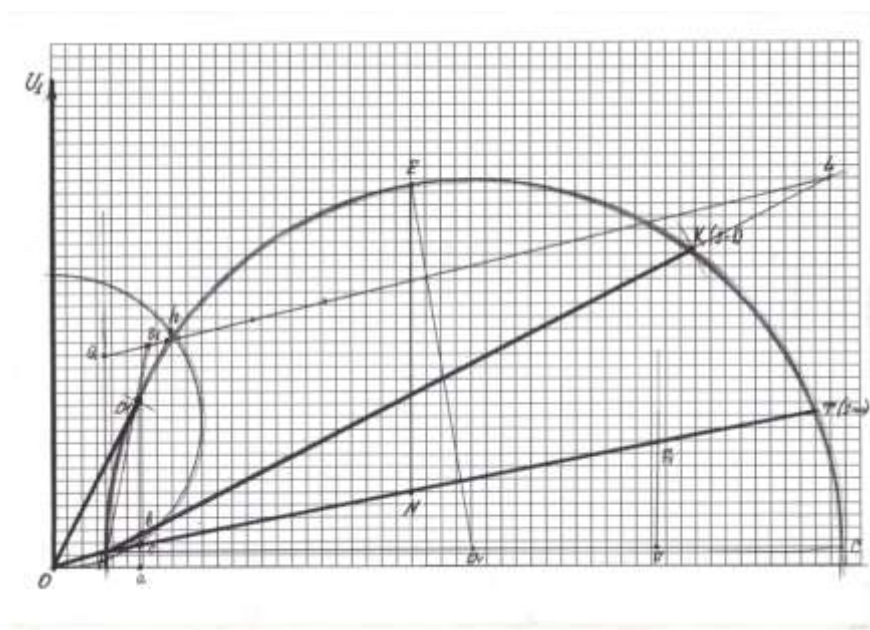


Рисунок 26. Круговая диаграмма

14) Из точки Н через точку F_1 проводим прямую до пересечения с окружностью токов в точке Т.

15) Из точки O_1 опускаем перпендикуляр на линию $\overline{NT}$ и продолжаем ее до пересечения с окружностью токов в точке E .

16) Из точки Е опускаем вертикаль до пересечения с $\overline{HT}$ (точка N). $\overline{EN}$ максимальный момент двигателя.

17) На оси ординат радиусом 50 мм проводим полуокружность, проходящую через точку О.

18) Линию OD_1 продолжаем до пересечения с полуокружностью в точке h

$$\cos \varphi_1 = \frac{\overline{Oh}}{100} = \frac{89}{100} = 0,89$$

19) Из точки Н параллельно оси ординат проводим линию HQ

20) Из точки Q параллельно линии $\overline{HT}$ проводим линию до пересечения с $\overline{HK}$ в точке L.

Линия QL – шкала скольжения: в точке Н $s=0$, в точке К $s=1$.

21) Продолжим HD_1 до пересечения с QL, получим s_1 (номинальный режим) $s_1 = 0,054$

22) Частота вращения двигателя

$$n_{\text{ном}} = n_1 \cdot (1 - s_1) = 1500 \cdot (1 - 0,054) = 1419 \text{ об/мин}$$

23) Номинальная мощность двигателя (проверка)

$$P_{\text{ном}} = \overline{D1b} \cdot m_p = 45,5 \cdot 66 = 3 \text{ кВт}$$

24) Потребляемая в номинальном режиме мощность

$$P_{1\text{ном}} = \overline{D1a} \cdot m_p = 57 \cdot 66 = 3,7 \text{ кВт}$$

25) КПД двигателя в номинальном режиме

$$\eta_{\text{ном}} = \frac{\overline{D1b}}{\overline{D1a}} = \frac{45,5}{57} = 0,8$$

26) Электромагнитный момент в номинальном режиме

$$M_{\text{ном}} = \overline{D1c} \cdot m_M = 50 \cdot 0,42 = 21 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Расчетно-графическое задание №18.

Тема: «Круговая диаграмма асинхронного двигателя»

Задание:

Трехфазный асинхронный двигатель имеет данные, указанные в табл.32.

Требуется:

Построить упрощенную круговую диаграмму и определить параметры, соответствующие его номинальному режиму работы.

Таблица 32 (по третьей цифре варианта)

Наименование величин	варианты									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$P_{\text{ном}}$, кВт	12	70	22	250	16	12	70	22	250	16
$U_{1\phi}$, В	220	220	220	1730	220	220	220	220	1730	220
$I_{1\phi}$, А	25	190	54	60	40	25	190	54	60	40
$2p$	4	4	8	6	8	4	4	8	6	8
r_1 , Ом	0,32	0,035	0,15	0,68	0,15	0,32	0,035	0,15	0,68	0,15
$I_{0\phi}$, А	9,7	55	32,8	17,5	9,6	9,7	55	32,8	17,5	9,6
P_0 , Вт	565	6500	1340	10750	950	565	6500	1340	10750	950
P'_0 , Вт	475	6180	112	10125	890	475	6180	112	10125	890
$p_{\text{мех}}$, Вт	250	600	370	1350	270	250	600	370	1350	270
$\cos \varphi_0$	0,1	0,2	0,064	0,12	0,15	0,1	0,2	0,064	0,12	0,15
P_{κ} , Вт	1780	9500	2360	12160	1740	1780	9500	2360	12160	1740
$U_{\kappa\phi}$, В	57,8	58	44	360	42	57,8	58	44	360	42
$\cos \varphi_{\kappa}$	0,34	0,3	0,33	0,25	0,34	0,34	0,3	0,33	0,25	0,34

Частота тока 50 Гц.

5. Рабочие характеристики асинхронного двигателя

Основными характеристиками асинхронного двигателя являются рабочие характеристики.

Рабочими характеристиками асинхронного двигателя называются зависимости $s, I, P_1, \cos \varphi, \eta (P_2)$ при $U_1 = U_{1ном} = const, f_1 = f_2 = const$. Рабочие характеристики можно построить по данным или рассчитать с использованием круговой диаграммы.

Пример № 24.

Трехфазный асинхронный двигатель имеет следующие параметры: номинальная мощность $P_{ном} = 3\text{кВт}$; напряжение на обмотке статора $U_{1ф} = 220\text{В}$; номинальный ток статора (фазный) $I_{1ф} = 6,3\text{А}$; число полюсов $2p = 4$; активное сопротивление фазной обмотки статора при рабочей температуре $r_1 = 1,7\text{Ом}$; ток холостого хода (фазный) $I_{0ф} = 1,83\text{А}$; мощность холостого хода $P_0 = 300\text{Вт}$; мощность идеального холостого хода $P'_0 = P_0 - 3 \cdot I_0 \cdot r_1 = 283\text{Вт}$; механические потери $p_{мех} = 200\text{Вт}$; коэффициент мощности холостого хода $\cos \varphi_0 = 0,24$; мощность короткого замыкания $P_k = 418\text{Вт}$; напряжение короткого замыкания (фазное) $U_k = 59,5\text{В}$; коэффициент мощности короткого замыкания $\cos \varphi_k = 0,37$; частота тока 50Гц . Требуется рассчитать параметры и построить рабочие характеристики двигателя: $I_1, M_2, n_2, \cos \varphi_1, \eta = f(P_2)$. При этом можно воспользоваться упрощенной круговой диаграммой (см. пример №23).

Решение:

- 1) Активная и реактивная составляющие тока холостого хода

$$I_{0a} = I_{0ф} \cdot \cos \varphi_0 = 1,83 \cdot 0,24 = 0,44 \text{ А}$$

$$I_{0p} = I_{0ф} \cdot \sin \varphi_0 = 1,83 \cdot 0,97 = 1,78 \text{ А}$$

- 2) Сопротивление короткого замыкания

$$z_k = \frac{U_k}{I_{1ф}} = \frac{59,5}{6,3} = 9,44 \text{ Ом}$$

- 3) Активная и реактивная составляющие сопротивлений короткого замыкания

$$r_k = z_k \cdot \cos \varphi_k = 9,44 \cdot 0,37 = 3,5 \text{ Ом}$$

$$x_k = z_k \cdot \sin \varphi_k = 9,44 \cdot 0,927 = 8,75 \text{ Ом}$$

- 4) Приведенное значение активного сопротивления обмотки ротора

$$r'_2 = r_k - r_1 = 3,5 - 1,7 = 1,8 \text{ Ом}$$

- 5) Критическое скольжение

$$s_{кр} \approx \frac{r'_2}{x_k} = \frac{1,8}{8,75} = 0,21$$

- 6) Номинальное скольжение $s_{ном} = 0,054$ (см. пример №23).

- 7) Магнитные потери

$$p_c = P'_0 - p_{мех} = 283 - 200 = 83 \text{ Вт}$$

- 8) Для расчета параметров задаемся рядом значений скольжения. Результаты расчетов сводим в табл.33

Таблица 33.

s	0,01	0,02	0,03	0,04	0,054	0,06
$r'_2/s = 1,8/s, \text{Ом}$	180	90	60	45	33,33	30
$r_k = r_1 + r'_2/s, \text{Ом}$	181,7	91,7	61,7	46,7	35,03	31,7
$z_k = \sqrt{r_k^2 + x_k^2}, \text{Ом}$	181,9	92,1	62,3	47,5	36,1	32,9
$\cos \varphi_2 = r_k/z_k$	0,999	0,995	0,990	0,983	0,970	0,964
$I'_2 = U_1/z_k, \text{А}$	1,21	2,39	3,53	4,63	6,09	6,69
$I'_{2a} = I'_2 \cdot \cos \varphi_2, \text{А}$	1,21	2,38	3,50	4,55	5,91	6,45
$I'_{2p} = I'_2 \cdot \sin \varphi_2, \text{А}$	0,06	0,23	0,50	0,85	1,48	1,78
$I_{1a} = I_{0a} + I'_{2a}, \text{А}$	1,65	2,82	3,94	4,99	6,35	6,89
$I_{1p} = I_{0p} + I'_{2p}, \text{А}$	1,84	2,01	2,28	2,63	3,26	3,56
$I_1 = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1p}^2}, \text{А}$	2,47	3,46	4,55	5,64	7,14	7,75
$\cos \varphi_1 = I_{1a}/I_1$	0,668	0,815	0,866	0,884	0,890	0,888
$P_1 = 3 \cdot U_1 \cdot I_{1a}, \text{Вт}$	1088	1860	2597	3294	4192	4547

$n_2 = 1500 \cdot (1 - s)$, об/мин	1485	1470	1455	1440	1419	1410
$p_{эл1} = 3 \cdot I_1^2 \cdot r_1$, Вт	31	61	105	162	260	307
$P_{эм} = P_1 - p_{эл1} - p_c$, Вт	974	1716	2409	3049	3849	4157
$\beta^2 = (I_1/I_{1ном})^2$	0,15	0,30	0,52	0,80	1,28	1,51
$p_{доб} = 0,005 \cdot P_1 \cdot \beta^2$, Вт	3,2	6,3	10,9	16,8	26,9	31,8
$p_{эл2} = s \cdot P_{эм}$, Вт	10	34	72	122	208	249
$P_2 = P_{эм} - p_{эл2} - p_{мех} - p_{доб}$, Вт	761	1475	2126	2710	3414	3676
s	0,01	0,02	0,03	0,04	0,054	0,06
$M_2 = 9,55 \cdot P_2/n_2$, Н·м	4,89	9,58	13,95	17,97	22,98	24,90
$\eta = P_2/P_1$	0,699	0,793	0,818	0,823	0,815	0,808

9) По полученным данным строим рабочие характеристики двигателя (рис.27)

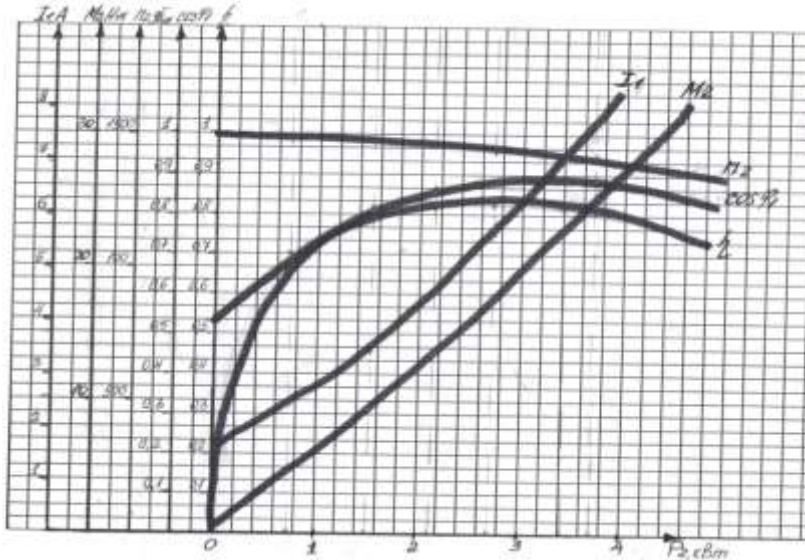


Рисунок 27. Рабочие характеристики АД.

Расчетно-графическое задание №19.

Тема: «Рабочие характеристики асинхронного двигателя»

Задание:

Трехфазный асинхронный двигатель имеет данные, указанные в табл.34.

Требуется:

Рассчитать параметры и построить рабочие характеристики двигателя: I_1 , M_2 , n_2 , $\cos \varphi_1$, $\eta = f(P_2)$. При этом можно воспользоваться упрощенной круговой диаграммой (см. РГЗ №18 «Круговая диаграмма»).

Таблица 34

Наименование величин	варианты									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$P_{ном}$, кВт	12	70	22	250	16	12	70	22	250	16
$U_{1ф}$, В	220	220	220	1730	220	220	220	220	1730	220
$I_{1ф}$, А	25	190	54	60	40	25	190	54	60	40
$2p$	4	4	8	6	8	4	4	8	6	8
r_1 , Ом	0,32	0,035	0,15	0,68	0,15	0,32	0,035	0,15	0,68	0,15
$I_{0ф}$, А	9,7	55	32,8	17,5	9,6	9,7	55	32,8	17,5	9,6
P_0 , Вт	565	6500	1340	10750	950	565	6500	1340	10750	950
P'_0 , Вт	475	6180	112	10125	890	475	6180	112	10125	890
$p_{мех}$, Вт	250	600	370	1350	270	250	600	370	1350	270
$\cos \varphi_0$	0,1	0,2	0,064	0,12	0,15	0,1	0,2	0,064	0,12	0,15
$P_{к}$, Вт	1780	9500	2360	12160	1740	1780	9500	2360	12160	1740

$U_{кф}, В$	57,8	58	44	360	42	57,8	58	44	360	42
$\cos \varphi_k$	0,34	0,3	0,33	0,25	0,34	0,34	0,3	0,33	0,25	0,34

Частота тока 50 Гц.

6. Механические характеристики асинхронного двигателя

Механическая характеристика асинхронного двигателя представляет собой зависимость скорости вращения двигателя (или скольжения) от момента на его валу.

Расчет механической характеристики производится по формуле

$$M = \frac{2 \cdot M_k}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}}$$

Пример № 25.

Для асинхронного двигателя построить естественную механическую характеристику и искусственную характеристику при введении в цепь ротора добавочного сопротивления $r_d = 0,1r_{2ном}$. Параметры двигателя: $U_{1ном} = 380 В$, $P_{2ном} = 14 кВт$, $n_{ном} = 950 об/мин$, $\lambda_m = 1,8$, $E_{2к} = 157 В$, $I_{2ном} = 63 А$, $p = 3$.

Решение:

- 1) Электромагнитный момент двигателя в номинальном режиме

$$M_{ном} = 9,55 \cdot \frac{P_{2ном}}{n_{ном}} = 9,55 \cdot \frac{14 \cdot 10^3}{950} = 141 Н \cdot м$$

- 2) Критический (максимальный) момент двигателя

$$M_k = M_{ном} \cdot \lambda_m = 141 \cdot 1,8 = 253 Н \cdot м$$

- 3) Синхронная скорость вращения

$$n_1 = \frac{60 \cdot f_{ном}}{p} = \frac{60 \cdot 50}{3} = 1000 об/мин$$

- 4) Скольжение при номинальном режиме работы

$$s_{ном} = \frac{n_1 - n_{ном}}{n_1} = \frac{1000 - 950}{1000} = 0,05$$

- 5) Критическое скольжение

$$s_k = s_{ном} \cdot (\lambda_m + \sqrt{\lambda_m^2 - 1}) = 0,05 \cdot (1,8 + \sqrt{1,8^2 - 1}) = 0,165$$

- 6) Расчет естественной механической характеристики двигателя производится по формуле

$$M = \frac{2 \cdot M_k}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}} = \frac{2 \cdot 253}{\frac{s}{0,165} + \frac{0,165}{s}}$$

и сводится в таблицу 35.

- 7) Номинальное активное сопротивление обмотки ротора двигателя

$$r_{2ном} = \frac{E_{2к}}{\sqrt{3} \cdot I_{2ном}} = \frac{157}{\sqrt{3} \cdot 63} = 1,44 Ом$$

- 8) Активное сопротивление обмоток ротора при номинальном режиме работы

$$r_2 = r_{2ном} \cdot s_{ном} = 1,44 \cdot 0,05 = 0,072 Ом$$

- 9) Величина добавочного сопротивления

$$r_d = 0,1 \cdot r_{2ном} = 0,1 \cdot 1,44 = 0,144 Ом$$

- 10) Величина скольжения на реостатной характеристики

$$s_{и} = \frac{r_d + r_2}{r_2} \cdot s_e = \frac{0,144 + 0,072}{0,072} \cdot s = 3 \cdot s$$

Расчет реостатной характеристики сведен в таблице 35. По результатам расчетов строим характеристики (рисунок 28).

Таблица 35.

s	0	0,05	0,1	0,165	0,2	0,3	0,5	0,7	1
M, Н·м	0	140,44	224,28	253,00	248,39	213,67	150,58	112,99	81,28

s_{II}	0	0,15	0,3	0,495	0,6	0,9	-	-	-
----------	---	------	-----	-------	-----	-----	---	---	---

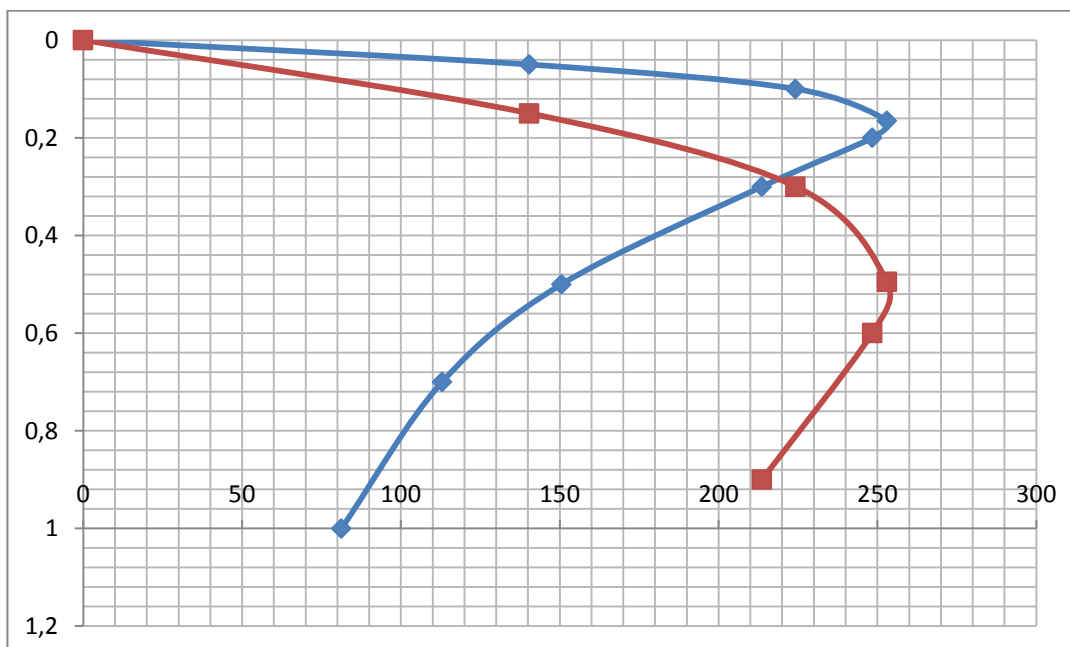


Рисунок 28. Механические характеристики АД.

Расчетно-графическое задание № 20.

Тема: «Расчет механических характеристик асинхронного двигателя»

Задание:

Трехфазный асинхронный двигатель имеет данные, указанные в табл.36.

Требуется:

1. Определить перегрузочную способность двигателя.
2. Рассчитать и построить:
 - а) естественную характеристику двигателя;
 - б) искусственную характеристику при введении в цепь ротора добавочного сопротивления;
 - в) искусственную характеристику при снижении напряжения сети.

Данные для построения искусственных характеристик приведены в табл.37.

Таблица 36 (по второй цифре варианта)

Наименование величин	варианты									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$P_{2ном}, \text{кВт}$	4,5	7	10	14	20	28	40	55	75	100
$U_{\phi}/U_{л}, \text{В}$	$\frac{220}{380}$	$\frac{220}{380}$	$\frac{220}{380}$	$\frac{220}{380}$	$\frac{220}{380}$	$\frac{220}{380}$	$\frac{220}{380}$	$\frac{220}{380}$	$\frac{220}{380}$	$\frac{220}{380}$
$2p$	8	6	4	4	4	4	8	6	4	4
$r_1, \text{Ом}$	1,3	0,9	0,7	0,4	0,25	0,16	0,1	0,07	0,05	0,03
$x_1, \text{Ом}$	2,7	1,8	1,5	1	0,75	0,55	0,4	0,26	0,2	0,14
$r_2', \text{Ом}$	0,7	0,5	0,4	0,25	0,15	0,11	0,06	0,04	0,03	0,024
$x_2', \text{Ом}$	3,1	2,1	1,5	1	0,8	0,6	0,63	0,38	0,24	0,2
$n_{ном}, \text{об/мин}$	700	960	1440	1460	1445	1450	720	950	1455	1470

Таблица 37(по третьей цифре варианта)

Вар-т	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$r_{\partial}, \text{Ом}$	0,2	1,3	0,14	0,8	1,6	0,7	0,08	2,2	0,42	1,15
$U/U_{ном}$	0,4	0,8	0,75	0,44	0,62	0,7	0,9	0,37	0,5	0,68

7. Пуск асинхронного двигателя

При пуске двигателей с фазным ротором в цепь обмотки ротора вводится добавочное активное сопротивление – пусковой реостат.

Пусковые реостаты выполняются металлическими и рассчитываются на кратковременную работу. Изменение сопротивлений пускового реостата осуществляется ступенями, вручную или автоматически с помощью контакторов. При введении в цепь ротора асинхронного двигателя добавочного активного сопротивления одновременно уменьшается пусковой ток и увеличивается пусковой момент.

Величина сопротивления пускового реостата выбирается такой, чтобы пусковой ток $I_{\Pi} = (2 \div 2,5)I_{\text{ном}}$, а $M_{\Pi} \leq 0,85M_{\text{к}}$. Процессы при пуске осуществляются аналогично ДПТ.

Существует два метода расчета пусковых реостатов: графо-аналитический и аналитический. Графо-аналитический более точен, но более трудоемок. Аналитический более прост, но менее точен, так как в основе метода лежит допущение о прямолинейности рабочего участка механической характеристики АД.

Пример № 26.

Для асинхронного двигателя рассчитать пусковое сопротивление, если пуск двигателя производится в три ступени. Параметры двигателя: $U_{1\text{ном}} = 380 \text{ В}$, $P_{2\text{ном}} = 14 \text{ кВт}$, $n_{\text{ном}} = 950 \text{ об/мин}$, $\lambda_{\text{м}} = 1,8$, $E_{2\text{к}} = 157 \text{ В}$, $I_{2\text{ном}} = 63 \text{ А}$, $p = 3$.

Решение:

1. Графоаналитический метод.

1) Электромагнитный момент двигателя в номинальном режиме

$$M_{\text{ном}} = 9,55 \cdot \frac{P_{2\text{ном}}}{n_{\text{ном}}} = 9,55 \cdot \frac{14 \cdot 10^3}{950} = 141 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

2) Критический (максимальный) момент двигателя

$$M_{\text{к}} = M_{\text{ном}} \cdot \lambda_{\text{м}} = 141 \cdot 1,8 = 253 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

3) Синхронная скорость вращения

$$n_1 = \frac{60 \cdot f_{\text{ном}}}{p} = \frac{60 \cdot 50}{3} = 1000 \text{ об/мин}$$

4) Скольжение при номинальном режиме работы

$$s_{\text{ном}} = \frac{n_1 - n_{\text{ном}}}{n_1} = \frac{1000 - 950}{1000} = 0,05$$

5) Критическое скольжение

$$s_{\text{к}} = s_{\text{ном}} \cdot (\lambda_{\text{м}} + \sqrt{\lambda_{\text{м}}^2 - 1}) = 0,05 \cdot (1,8 + \sqrt{1,8^2 - 1}) = 0,165$$

6) Расчет естественной механической характеристики двигателя производится по формуле

$$M = \frac{2 \cdot M_{\text{к}}}{\frac{s}{s_{\text{к}}} + \frac{s_{\text{к}}}{s}} = \frac{2 \cdot 253}{\frac{s}{0,165} + \frac{0,165}{s}}$$

и сводится в таблицу 38.

Таблица 38.

s	0	0,05	0,1	0,165	0,2
M, Н·м	0	140,44	224,28	253,00	248,39

7) Номинальное активное сопротивление обмотки ротора двигателя

$$r_{2\text{ном}} = \frac{E_{2\text{к}}}{\sqrt{3} \cdot I_{2\text{ном}}} = \frac{157}{\sqrt{3} \cdot 63} = 1,44 \text{ Ом}$$

8) По данным таблицы строим рабочую часть естественной механической характеристики и выполняем построение нормальной пусковой диаграммы (рис.29).

Принимаем начальный пусковой момент $M_1 = 0,85 \cdot M_{\text{к}} = 0,85 \cdot 253 = 215 \text{ Н} \cdot \text{м}$; момент переключения $M_2 = 0,8 \cdot M_{\text{ном}} = 0,8 \cdot 141 = 113 \text{ Н} \cdot \text{м}$ (подбираем так, чтобы получить три ступени пуска на пусковой диаграмме).

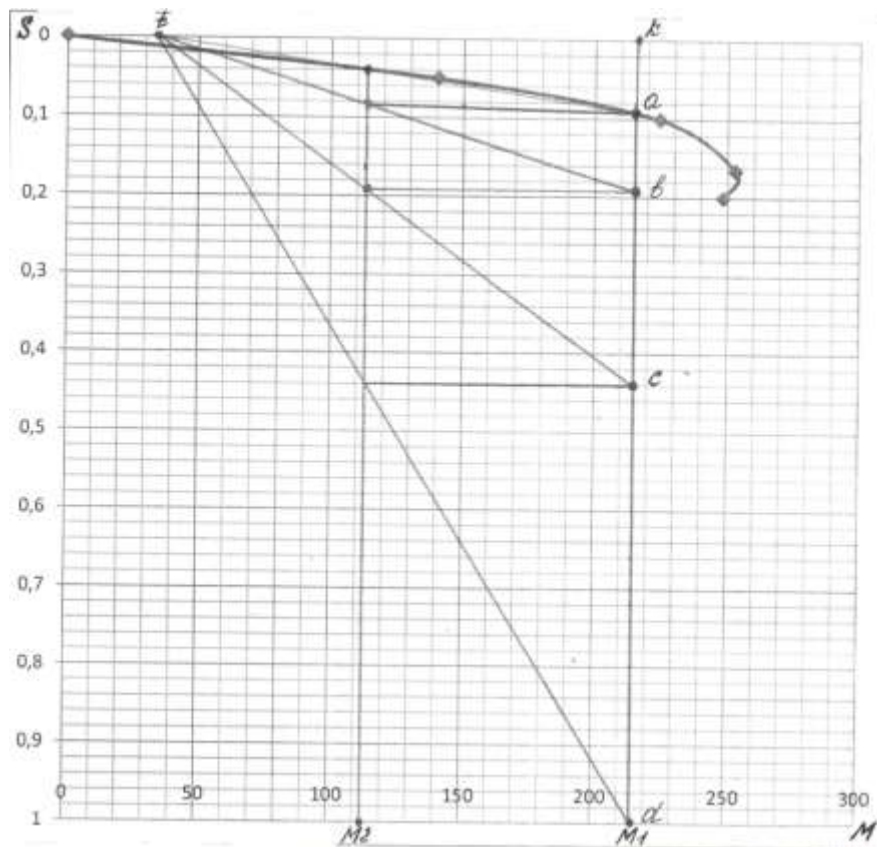


Рисунок 29. Нормальная пусковая диаграмма АД.

9) Сопротивление ступеней пускового реостата:

$$r_{п1} = r_{2ном} \cdot \frac{cd}{ka} = 1,44 \cdot \frac{86}{14} = 8,846 \text{ Ом}$$

$$r_{п2} = r_{2ном} \cdot \frac{bc}{ka} = 1,44 \cdot \frac{38}{14} = 3,909 \text{ Ом}$$

$$r_{п3} = r_{2ном} \cdot \frac{ab}{ka} = 1,44 \cdot \frac{14}{14} = 1,44 \text{ Ом}$$

10) Сопротивление пускового реостата

$$r_{п} = r_{п1} + r_{п2} + r_{п3} = 8,846 + 3,909 + 1,44 = 13,595 \text{ Ом}$$

II. Аналитический метод.

1) Отношение начального пускового момента к моменту переключения

$$\lambda = \frac{M_1}{M_2} = \frac{215}{113} = 1,9$$

2) Сопротивление ступеней резистора пускового реостата

$$r_{доб3} = r_{2ном} \cdot (\lambda - 1) = 1,44 \cdot (1,9 - 1) = 1,296 \text{ Ом}$$

$$r_{доб2} = r_{доб3} \cdot \lambda = 1,296 \cdot 1,9 = 2,462 \text{ Ом}$$

$$r_{доб1} = r_{доб2} \cdot \lambda = 2,462 \cdot 1,9 = 4,679 \text{ Ом}$$

3) Сопротивление ступеней пускового реостата

$$r_{п1} = r_{доб1} + r_{доб2} + r_{доб3} = 4,679 + 2,462 + 1,296 = 8,437 \text{ Ом}$$

$$r_{п2} = r_{доб2} + r_{доб3} = 2,462 + 1,296 = 3,758 \text{ Ом}$$

$$r_{п3} = r_{доб3} = 1,296 = 1,296 \text{ Ом}$$

4) Сопротивление пускового реостата

$$r_{п} = r_{п1} + r_{п2} + r_{п3} = 8,437 + 3,758 + 1,296 = 13,491 \text{ Ом}$$

Расчетно-графическое задание № 21.

Тема: «Расчет пусковых сопротивлений асинхронного двигателя»

Задание:

Трехфазный асинхронный двигатель имеет данные, указанные в табл.39.

Требуется:

Построить нормальную пусковую диаграмму и рассчитать пусковое сопротивление двигателя аналитическим и графоаналитическим методом.

Таблица 39 (по третьей цифре варианта)

Наименование величин	варианты									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$P_{2ном}, \text{кВт}$	4,5	7	10	14	20	28	40	55	75	100
$U_{\phi}/U_{л}, \text{В}$	$\frac{220}{380}$	$\frac{220}{380}$	$\frac{220}{380}$	$\frac{220}{380}$	$\frac{220}{380}$	$\frac{220}{380}$	$\frac{220}{380}$	$\frac{220}{380}$	$\frac{220}{380}$	$\frac{220}{380}$
$2p$	8	6	4	4	4	4	8	6	4	4
$r_1, \text{Ом}$	1,3	0,9	0,7	0,4	0,25	0,16	0,1	0,07	0,05	0,03
$x_1, \text{Ом}$	2,7	1,8	1,5	1	0,75	0,55	0,4	0,26	0,2	0,14
$r_2', \text{Ом}$	0,7	0,5	0,4	0,25	0,15	0,11	0,06	0,04	0,03	0,024
$x_2', \text{Ом}$	3,1	2,1	1,5	1	0,8	0,6	0,63	0,38	0,24	0,2
$n_{ном}, \text{об/мин}$	700	960	1440	1460	1445	1450	720	950	1455	1470

8. Регулирование скорости асинхронного двигателя

Скорость вращения ротора асинхронного двигателя определяется выражением

$$n_2 = (1 - s) \cdot n_1 = (1 - s) \cdot \frac{60 \cdot f_1}{p}$$

Из этого выражения следует, что скорость вращения ротора можно регулировать тремя способами: изменением частоты в сети f_1 , числа пар полюсов обмотки статора p и скольжения s . Скольжение двигателя можно изменять путем изменения подводимого к нему напряжения или величины сопротивления в цепи статора или ротора (для АД с фазным ротором).

Введение в цепь ротора добавочного активного сопротивления, как при пуске, применяется в АД с фазным ротором наиболее часто. Однако добавочные сопротивления (регулируемый реостат), в отличие от пускового, должно быть рассчитано на длительную работу.

Пример № 27.

Для АД типа МТН-312-6 с паспортными данными $P_{2ном} = 17,5 \text{ кВт}$, $U_{1ном} = 380 \text{ В}$, $n_{ном} = 945 \text{ об/мин}$, $\lambda_m = 2,5$, $I_{2ном} = 43 \text{ А}$, $p = 3$; $r_1 = 0,64 \text{ Ом}$; $x_1 = 0,43 \text{ Ом}$; $r_2 = 0,49 \text{ Ом}$; $x_2 = 0,45 \text{ Ом}$ рассчитать добавочный резистор $r_{рег}$, при включении которого в цепь ротора механическая характеристика пройдет через точку с координатами $n_{и} = 0,6 \cdot n_{ном}$; $M_{и} = 0,9 \cdot M_{ном}$.

Решение:

- 1) Синхронная частота вращения

$$n_1 = \frac{60 \cdot f_{1ном}}{p} = \frac{60 \cdot 50}{3} = 1000 \text{ об/мин}$$

- 2) Скольжение АД в номинальном режиме

$$s_{ном} = \frac{n_1 - n_{ном}}{n_1} = \frac{1000 - 945}{1000} = 0,055$$

- 3) Критическое скольжение АД на естественной характеристике

$$s_k = s_{ном} \cdot (\lambda_m + \sqrt{\lambda_m^2 - 1}) = 0,055 \cdot (2,5 + \sqrt{2,5^2 - 1}) = 0,26$$

- 4) Скольжение АД на регулировочной характеристике

$$s_{и} = \frac{n_1 - n_{и}}{n_1} = \frac{n_1 - 0,6 \cdot n_{и}}{n_1} = \frac{1000 - 0,6 \cdot 945}{1000} = 0,433$$

- 5) Критическое скольжение на регулировочной характеристике

$$s_{ки} = s_{и} \cdot \left(\frac{M_K}{M_{и}} + \sqrt{\left(\frac{M_K}{M_{и}} \right)^2 - 1} \right) = s_{и} \cdot \left(\frac{M_K}{0,9 \cdot M_{ном}} + \sqrt{\left(\frac{M_K}{0,9 \cdot M_{ном}} \right)^2 - 1} \right) \\ = s_{и} \cdot \left(\frac{\lambda_M}{0,9} + \sqrt{\left(\frac{\lambda_M}{0,9} \right)^2 - 1} \right) = 0,433 \cdot \left(\frac{2,5}{0,9} + \sqrt{\left(\frac{2,5}{0,9} \right)^2 - 1} \right) = 1,78$$

6) Сопротивление регулировочного резистора

$$r_{пер} = r_2 \cdot \left(\frac{s_{ки}}{s_K} - 1 \right) = 0,49 \cdot \left(\frac{1,78}{0,26} - 1 \right) = 2,86 \text{ Ом}$$

7) Электромагнитный момент двигателя

$$M_{ном} = 9,55 \cdot \frac{P_{2ном}}{n_{ном}} = 9,55 \cdot \frac{17,5 \cdot 10^3}{945} = 177 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

8) Критический (максимальный) момент двигателя

$$M_K = M_{ном} \cdot \lambda_M = 177 \cdot 2,5 = 442 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

9) Расчет естественной механической характеристики двигателя производится по формуле

$$M = \frac{2 \cdot M_K}{\frac{s}{s_K} + \frac{s_K}{s}} = \frac{2 \cdot 442}{\frac{s}{0,26} + \frac{0,26}{s}}$$

и сводится в таблицу 40.

10) Величина скольжения на регулировочной характеристике производится по формуле

$$s_{и} = \frac{r_{пер} + r_2}{r_2} \cdot s = \frac{2,86 + 0,49}{0,49} \cdot s = 6,85 \cdot s$$

и сводится в таблицу 40. По результатам расчетов строим характеристики (рис.30).

Таблица 40.

$M, \text{ Н} \cdot \text{м}$	0	163,94	296,19	427,21	442,00	437,51	361,84	288,54	215,29	161,93
s	0	0,05	0,1	0,2	0,26	0,3	0,5	0,7	1	1,37
s_u	0	0,34	0,685	1,37	-	-	-	-	-	-

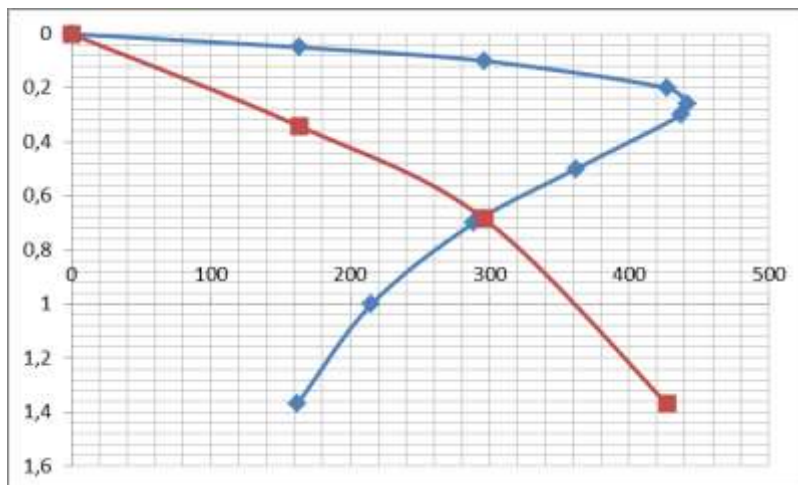


Рисунок 30. Механические характеристики АД

Расчетно-графическое задание №22.

Тема: «Расчет регулировочных резисторов и характеристик асинхронного двигателя»

Задание:

1. Рассчитать добавочное сопротивление, при включении которого в цепь ротора:

а) механическая характеристика пройдет через точку с координатами $n_{и} = k \cdot n_{ном}$; $M_{и} = h \cdot$

$M_{ном}$ ($I_{и} = h \cdot I_{ном}$);

б) угловая скорость снизится в n раз при номинальном моменте нагрузки.

2. Построить естественную и регулировочные характеристики.

Данные для расчета даны в таблицах 41 – 42.

Табл.41. Паспортные данные двигателя (по первой цифре варианта)

Вар-т	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$P_{ном}$, кВт	9	5	12	12	9,5	4	10	16	17	8
$U_{ном}$, В	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380
$n_{ном}$, об/мин	940	990	740	1450	950	700	920	710	900	1460
$I_{ном}$, А	44	24	56	57	48	20	50	74	78	38
$2p$	6	6	8	4	6	8	6	8	6	4
$E_{2к}$, В	154	155	156	157	158	159	160	161	162	163
λ_m	2,4	2,2	2,0	1,8	2,6	2,5	2,1	1,9	2,3	1,7

Табл.42. Данные для расчета искусственных характеристик (по второй цифре варианта)

Вар-т	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
k	0,4	0,6	0,2	0,5	0,3	0,7	0,25	0,45	0,54	0,8
h	0,9	0,7	0,85	0,8	0,92	0,76	0,66	0,72	0,6	0,88
n	1,5	2	1,2	2,5	3	2,2	1,8	2,1	2,7	2,6

9. Расчет параметров синхронного генератора

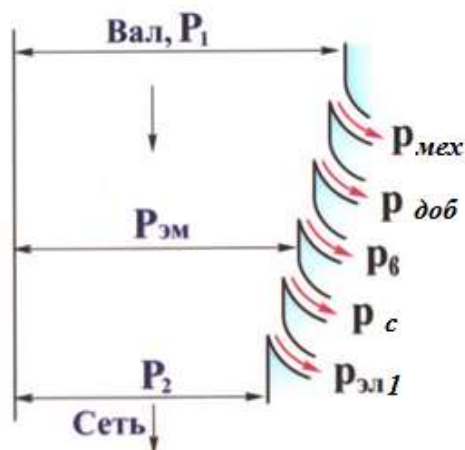
Синхронной называется такая машина переменного тока, частота вращения ротора которой находится в строго постоянном отношении к частоте тока в сети

$$n_1 = \frac{60 \cdot f_1}{p}, \text{ об/мин}$$

где частота вращения n_1 называется синхронной.

Энергетические процессы, происходящие в синхронном генераторе рассмотрим на примере энергетической диаграммы (рис.31).

Пусть P_1 – механическая мощность, подводимая к валу генератора. Она расходуется на потери на возбуждение p_v , механические потери на трение $p_{мех}$ и добавочные потери $p_{доб}$. Оставшаяся часть мощности называется электромагнитной и передается в обмотку статора (якоря) $P_{эм} = P_1 - p_v - p_{мех} - p_{доб}$. В обмотке статора возникают электрические потери $p_{эл1}$ и магнитные потери в стали сердечника статора p_c . Таким образом, полезная мощность, отдаваемая в сеть,



$$P_2 = P_{эм} - p_{эл1} - p_c.$$

Рисунок 31. Энергетическая диаграмма СГ

Пример № 28.

Трехфазный синхронный генератор имеет следующие параметры: номинальное (линейное) напряжение $U_{1ном} = 6,3$ кВ при частоте тока 50 Гц, обмотка статора соединена «звездой», КПД генератора при номинальной нагрузке $\eta_{ном} = 92 \%$, число полюсов $2p = 6$, полная номинальная мощность на выходе $S_{ном} = 330$ кВА, коэффициент мощности $\cos \varphi_{1ном} = 0,9$. Требуется

определить номинальный ток статора $I_{1\text{ном}}$, мощность на входе генератора $P_{1\text{ном}}$, полезную мощность на выходе генератора $P_{\text{ном}}$, суммарные потери в режиме номинальной нагрузки $\Sigma p_{\text{ном}}$, вращающий момент первичного двигателя при номинальной нагрузке $M_{1\text{ном}}$.

Решение:

- 1) Полезная мощность на выходе генератора

$$P_{\text{ном}} = S_{\text{ном}} \cdot \cos \varphi_{1\text{ном}} = 330 \cdot 10^3 \cdot 0,9 = 297 \cdot 10^3 \text{ ВА} = 297 \text{ кВА}$$

- 2) Мощность на входе генератора

$$P_{1\text{ном}} = \frac{P_{\text{ном}}}{\eta_{\text{ном}}} = \frac{297 \cdot 10^3}{0,92} = 322\,826 \text{ Вт}$$

- 3) Суммарные потери

$$\Sigma p_{\text{ном}} = P_{1\text{ном}} - P_{\text{ном}} = 322\,826 - 297\,000 = 25\,826 \text{ Вт}$$

- 4) Ток статора в номинальном режиме

$$I_{1\text{ном}} = \frac{S_{\text{ном}}}{\sqrt{3} \cdot U_{1\text{ном}}} = \frac{330 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 6,3 \cdot 10^3} = 30,28 \text{ А}$$

- 5) Синхронная частота вращения

$$n_1 = \frac{60 \cdot f_1}{p} = \frac{60 \cdot 50}{3} = 1000 \text{ об/мин}$$

- 6) Момент приводного двигателя, необходимый для вращения ротора генератора

$$M_{1\text{ном}} = 9,55 \cdot \frac{P_{1\text{ном}}}{n_1} = 9,55 \cdot \frac{322\,826}{1000} = 3083 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Расчетно-графическое задание № 23.

Тема: «Расчет параметров синхронного генератора»

Задание:

Трехфазный синхронный генератор имеет данные, указанные в табл.43.

Требуется:

Определить параметры, значение которых в табл.43 не указаны.

Таблица 43 (по третьей цифре варианта)

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$S_{\text{ном}}$, кВА	300	?	270	470	?	600	780	450	700	500
$U_{1\text{ном}}$, кВ	6,3	3,2	0,4	?	0,7	3,2	6,3	0,4	?	3,2
$\eta_{\text{ном}}$, %	94	?	?	91	90	93	?	?	93	92
$2p$	8	8	6	6	10	12	6	?	6	10
$P_{\text{ном}}$, кВт	?	?	?	?	?	?	667,4	?	?	?
$\Sigma p_{\text{ном}}$, кВт	?	27	18	?	?	?	?	?	?	?
$\cos \varphi_{1\text{ном}}$	0,88	?	0,85	0,9	?	0,92	?	0,9	0,92	0,85
$I_{1\text{ном}}$, А	?	72,2	?	43,1	190	?	?	?	64,2	?
$P_{1\text{ном}}$, кВт	?	340	?	?	190	?	717,6	487,3	?	?
$M_{1\text{ном}}$, Н·м	?	?	?	?	?	?	?	7735	?	?

10. Векторная диаграмма синхронного генератора

Векторные диаграммы синхронных генераторов имеют весьма большое значение для анализа работы. Они позволяют получить основные характеристики расчетным путем.

Векторные диаграммы явнополюсных и неявнополюсных синхронных машин строятся различными способами.

Напряжение на зажимах фазы обмотки якоря синхронного генератора при симметричной нагрузке равно сумме ЭДС, индуцируемых в обмотке основным магнитным потоком, потоком реакции якоря и потоками рассеяния, минус падение напряжения в активном сопротивлении

$$\dot{U} = \dot{E}_0 - jx_{ad}\dot{I}_d - jx_{aq}\dot{I}_q - jx_\sigma\dot{I} - r\dot{I}$$

В явнополюсных генераторах применяется метод двух реакций. В неявнополюсных генераторах воздушный зазор равномерный и $x_{ad} = x_{aq}$, в этом случае отпадает необходимость в применении метода двух реакций.

Вид векторной диаграммы, а так же свойства синхронных генераторов зависят от характера нагрузки.

Пример № 29.

Технические данные трехфазного синхронного явнополюсного генератора: основная ЭДС генератора (фазное значение) $E_0 = 280$ В, номинальный ток нагрузки генератора (фазный) $I_{1ном} = 54$ А, угол фазового сдвига между векторами $\dot{E}_0$ и $\dot{I}_1$ $\psi_1 = 50^\circ$ (нагрузка активно-индуктивная), индуктивные сопротивления: рассеяния обмотки статора $x_{\sigma 1} = 0,52$ Ом, реакции якоря по продольной оси $x_{ad} = 1$ Ом, реакции якоря по поперечной оси $x_{aq} = 0,74$ Ом.

Требуется построить векторную диаграмму генератора, определить номинальное напряжение $U_{1ном}$, номинальные значения полной $S_{ном}$ и активной $P_{ном}$ мощностей на выходе генератора и изменение напряжения при сбросе нагрузки $\Delta U_{ном}$.

Частота тока 50 Гц. Обмотки статора соединены «звездой». Активным сопротивлением обмоток статора пренебречь.

Решение:

- 1) Уравнение напряжения явнополюсного синхронного генератора

$$\dot{U}_1 = \dot{E}_0 + \dot{E}_{1d} + \dot{E}_{1q} + \dot{E}_{\sigma 1}$$

- 2) ЭДС реакции якоря по продольной оси

$$\dot{E}_{1d} = -j\dot{I}_1 x_{ad} \sin \psi_1 = -j54 \cdot 1 \cdot \sin 50^\circ = -j41,4 \text{ В}$$

- 3) ЭДС реакции якоря по поперечной оси

$$\dot{E}_{1q} = -j\dot{I}_1 x_{aq} \cos \psi_1 = -j54 \cdot 0,74 \cdot \cos 50^\circ = -j25,7 \text{ В}$$

- 4) ЭДС рассеяния

$$\dot{E}_{\sigma 1} = -j\dot{I}_1 x_{\sigma 1} = -j54 \cdot 0,52 = -j28,1 \text{ В}$$

- 5) Принимаем масштаб напряжения $m_U = 2$ В/мм.

- 6) Строим векторную диаграмму (рис.32):

- из начала диаграммы (точка О) в произвольном направлении проводим вектор тока $\dot{I}_1$;
- от этого вектора под углом ψ_1 в принятом масштабе проводим вектор основной ЭДС $\dot{E}_0$ (при индуктивном характере нагрузки ток отстает по фазе от ЭДС);
- из конца вектора $\dot{E}_0$ в обратном направлении проводим вектор ЭДС реакции якоря по продольной оси $\dot{E}_{1d}$ (так как при индуктивной нагрузке реакция якоря оказывает размагничивающее влияние);
- из конца этого вектора под углом 90° к вектору $\dot{E}_0$ проводим вектор ЭДС реакции якоря по поперечной оси $\dot{E}_{1q}$;
- из конца вектора $\dot{E}_{1q}$ под углом 90° к вектору тока проводим вектор ЭДС рассеяния $\dot{E}_{\sigma 1}$;
- соединяем начало диаграммы (точка О) с концом вектора $\dot{E}_{\sigma 1}$ и получаем вектор нормального напряжения на выходе генератора $\dot{U}_1$.

- 7) Номинальное напряжение

$$U_{1ном} = 105 \cdot 2 = 210 \text{ В}$$

При соединении обмотки статора «звездой» линейное напряжение на выходах обмотки статора

$$U_{1л} = \sqrt{3}U_{1ном} = \sqrt{3} \cdot 210 = 364 \text{ В}$$

- 8) Фазовый сдвиг (угол между векторами $\dot{U}_1$ и $\dot{I}_1$)

$$\varphi_{1ном} = 40^\circ$$

- 9) Коэффициент мощности

$$\cos \varphi_{1ном} = 0,766 \text{ (инд.)}$$

- 10) Полная номинальная мощность на выходе генератора

$$S_{ном} = 3U_{1ном}I_{1ном} = 3 \cdot 210 \cdot 54 = 34020 \text{ ВА} \approx 34 \text{ кВА}$$

- 11) Активная мощность на выходе генератора

$$P_{\text{ном}} = S_{\text{ном}} \cos \varphi_{1\text{ном}} = 34020 \cdot 0,766 = 26059 \text{ Вт} = 26,1 \text{ кВт}$$

12) Номинальное изменение напряжения при сбросе нагрузки

$$\Delta U_{\text{ном}} = \frac{E_0 - U_{1\text{ном}}}{U_{1\text{ном}}} \cdot 100 = \frac{280 - 210}{210} \cdot 100 = 33,3 \%$$

т.е. при сбросе нагрузки от номинального режима до холостого хода напряжение на выходе генератора увеличивается на 33,3%.

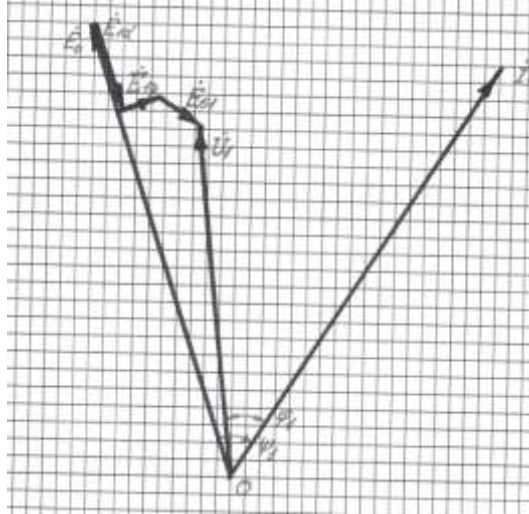


Рисунок 32. Векторная диаграмма синхронного генератора

Пример № 30.

Технические данные трехфазного синхронного явнополюсного генератора: основная ЭДС генератора (фазное значение) $E_0 = 280 \text{ В}$, номинальный ток нагрузки генератора (фазный) $I_{1\text{ном}} = 54 \text{ А}$, угол фазового сдвига между векторами $\dot{E}_0$ и $\dot{I}_1$ $\psi_1 = 25^\circ$ (нагрузка активно-емкостная), индуктивные сопротивления: рассеяния обмотки статора $x_{\sigma 1} = 0,52 \text{ Ом}$, реакции якоря по продольной оси $x_{ad} = 1 \text{ Ом}$, реакции якоря по поперечной оси $x_{aq} = 0,74 \text{ Ом}$.

Требуется построить векторную диаграмму генератора, определить номинальное напряжение $U_{1\text{ном}}$, номинальные значения полной $S_{\text{ном}}$ и активной $P_{\text{ном}}$ мощностей на выходе генератора и изменение напряжения при сбросе нагрузки $\Delta U_{\text{ном}}$.

Частота тока 50 Гц. Обмотки статора соединены «звездой». Активным сопротивлением обмоток статора пренебречь.

Решение:

- 1) Уравнение напряжения явнополюсного синхронного генератора

$$\dot{U}_1 = \dot{E}_0 + \dot{E}_{1d} + \dot{E}_{1q} + \dot{E}_{\sigma 1}$$

- 2) ЭДС реакции якоря по продольной оси

$$\dot{E}_{1d} = -j\dot{I}_1 x_{ad} \sin \psi_1 = -j54 \cdot 1 \cdot \sin 50^\circ = -j41,4 \text{ В}$$

- 3) ЭДС реакции якоря по поперечной оси

$$\dot{E}_{1q} = -j\dot{I}_1 x_{aq} \cos \psi_1 = -j54 \cdot 0,74 \cdot \cos 50^\circ = -j25,7 \text{ В}$$

- 4) ЭДС рассеяния

$$\dot{E}_{\sigma 1} = -j\dot{I}_1 x_{\sigma 1} = -j54 \cdot 0,52 = -j28,1 \text{ В}$$

- 5) Принимаем масштаб напряжения $m_U = 2 \text{ В/мм}$.

- 6) Строим векторную диаграмму (рис.33):

- из начала диаграммы (точка О) в произвольном направлении проводим вектор тока $\dot{I}_1$;
- от этого вектора под углом ψ_1 в принятом масштабе проводим вектор основной ЭДС $\dot{E}_0$ (при емкостном характере нагрузки ток опережает по фазе ЭДС);

- из конца вектора $\dot{E}_0$ в том же направлении проводим вектор ЭДС реакции якоря по продольной оси $\dot{E}_{1d}$ (так как при емкостной нагрузке реакция якоря оказывает подмагничивающее влияние);

- из конца этого вектора под углом 90° к вектору $\vec{E}_0$ проводим вектор ЭДС реакции якоря по поперечной оси $\vec{E}_{1q}$;
- из конца вектора $\vec{E}_{1q}$ под углом 90° к вектору тока проводим вектор ЭДС рассеяния $\vec{E}_{\sigma 1}$;
- соединяем начало диаграммы (точка О) с концом вектора $\vec{E}_{\sigma 1}$ и получаем вектор нормального напряжения на выходе генератора $\vec{U}_1$.

7) Номинальное напряжение

$$U_{1\text{ном}} = 168 \cdot 2 = 336 \text{ В}$$

При соединении обмотки статора «звездой» линейное напряжение на выходах обмотки статора

$$U_{1л} = \sqrt{3} U_{1\text{ном}} = \sqrt{3} \cdot 336 = 582 \text{ В}$$

8) Фазовый сдвиг (угол между векторами $\vec{U}_1$ и $\vec{I}_1$)

$$\varphi_{1\text{ном}} = 34^\circ$$

9) Коэффициент мощности

$$\cos \varphi_{1\text{ном}} = 0,829 \text{ (емк.)}$$

10) Полная номинальная мощность на выходе генератора

$$S_{\text{ном}} = 3 U_{1\text{ном}} I_{1\text{ном}} = 3 \cdot 336 \cdot 54 = 54432 \text{ ВА} \approx 54,4 \text{ кВА}$$

11) Активная мощность на выходе генератора

$$P_{\text{ном}} = S_{\text{ном}} \cos \varphi_{1\text{ном}} = 54432 \cdot 0,829 = 45124 \text{ Вт} = 45,1 \text{ кВт}$$

12) Номинальное изменение напряжения при сбросе нагрузки

$$\Delta U_{\text{ном}} = \frac{E_0 - U_{1\text{ном}}}{U_{1\text{ном}}} \cdot 100 = \frac{280 - 336}{336} \cdot 100 = -16,7 \%$$

т.е. при сбросе нагрузки от номинального режима до холостого хода напряжение на выходе генератора уменьшается на 16,7%.

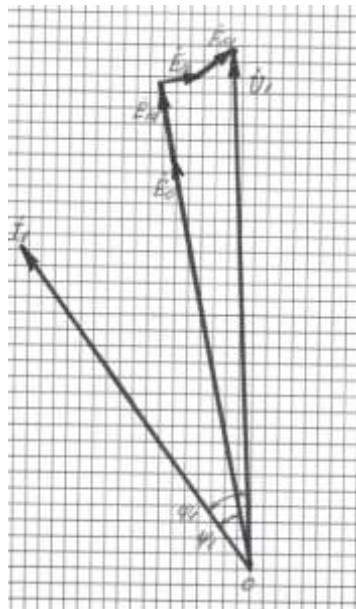


Рисунок 33. Векторная диаграмма синхронного генератора

Расчетно-графическое задание № 24.

Тема: «Векторная диаграмма синхронного генератора»

Задание:

Трехфазный синхронный генератор имеет данные, указанные в табл.44.

Требуется:

Построить векторную диаграмму.

Определить:

- номинальное напряжение $U_{1\text{ном}}$;
- номинальное значение полной $S_{\text{ном}}$ и активной $P_{\text{ном}}$ мощности;

- изменение напряжения при сбросе нагрузки $\Delta U_{ном}$.

Частота тока 50 Гц. Обмотки статора соединены «звездой». Активным сопротивлением обмоток статора пренебречь.

Таблица 44 (по третьей цифре варианта)

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
E_0 , В	275	284	298	260	265	275	284	298	260	265
$I_{ном}$, А	90	108	120	36	28	90	108	120	36	28
ψ_1 , °	48	50	45	55	48	24	25	22	28	24
x_l , Ом	0,15	0,12	0,08	0,04	0,48	0,15	0,12	0,08	0,04	0,48
x_{ad} , Ом	1,32	1,24	1,18	1,65	1,82	1,32	1,24	1,18	1,65	1,82
x_{aq} , Ом	0,55	0,48	0,32	1,15	1,22	0,55	0,48	0,32	1,15	1,22
нагрузка	акт- инд.	акт- инд.	акт- инд.	акт- инд.	акт- инд.	акт- емк.	акт- емк.	акт- емк.	акт- емк.	акт- емк.

11. Угловая характеристика синхронного генератора

Угловая характеристика синхронной машины представляет собой зависимость электромагнитного момента M от угла нагрузки θ . При этом следует помнить, что в явнополюсных синхронных машинах действует два момента: основной $M_{осн}$ и реактивный M_p , а в неявнополюсных только основной момент:

$$M_{осн} = \frac{m_1 U_1 E_0}{\omega_1 x_d} \sin \theta$$

$$M_p = \frac{m_1 U_1^2}{2\omega_1} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta$$

Пример № 31.

Трехфазный синхронный генератор явнополюсной конструкции номинальной мощностью $S_{ном} = 640$ кВА и числом полюсов $2p = 12$ включен на параллельную работу с сетью напряжением 6000 В, частотой 50 Гц. Статор генератора имеет длину $l_1 = 0,52$ м и диаметр $D_1 = 0,8$ м, магнитная индукция в воздушном зазоре $B_\delta = 0,88$ Тл, коэффициент заполнения сердечника статора сталью $k_c = 0,95$. Фазная обмотка статора содержит 420 последовательно соединенных витков с обмоточным коэффициентом $k_{об1} = 0,92$. Фазные обмотки соединены «звездой». Синхронные индуктивные сопротивления генератора: по продольной оси $x_d = 89$ Ом, по поперечной оси $x_q = 41,4$ Ом.

Требуется определить тормозные моменты, действующие на ротор генератора: основной $M_{осн}$, реактивный M_p и результирующий $M = M_{осн} + M_p$ и построить графики зависимости этих моментов от угла нагрузки θ .

Решение:

- 1) Фазное напряжение генератора

$$U_{1\phi} = \frac{U_1}{\sqrt{3}} = \frac{6000}{\sqrt{3}} = 3464 \text{ В}$$

- 2) Полюсное деление

$$\tau = \frac{\pi \cdot D_1}{2p} = \frac{\pi \cdot 0,8}{12} = 0,21 \text{ м}$$

- 3) Основной магнитный поток

$$\Phi = \frac{2}{\pi} B_\delta \cdot \tau \cdot l_1 \cdot k_c = \frac{2}{\pi} \cdot 0,88 \cdot 0,21 \cdot 0,52 \cdot 0,95 = 0,058 \text{ Вб}$$

- 4) Основная ЭДС генератора

$$E_0 = 4,44 \cdot f_1 \cdot \Phi \cdot w_1 \cdot k_{об1} = 4,44 \cdot 50 \cdot 0,058 \cdot 420 \cdot 0,92 = 4985 \text{ В}$$

- 5) Синхронная угловая скорость вращения

$$\omega_1 = \frac{2\pi f_1}{p} = \frac{2\pi \cdot 50}{6} = 52,4 \text{ рад/с}$$

- 6) Синхронная частота вращения

$$n_1 = \frac{60 \cdot f_1}{p} = \frac{60 \cdot 50}{6} = 500 \text{ об/мин}$$

7) Максимальное значение основного электромагнитного момента генератора ($\theta = 90^\circ$)

$$M_{\text{осн.max}} = \frac{m_1 \cdot U_{1\phi} \cdot E_0}{\omega_1 \cdot x_d} = \frac{3 \cdot 3464 \cdot 4985}{52,4 \cdot 89} = 11108 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

8) Максимальное значение реактивного момента генератора

$$M_{\text{р.max}} = \frac{m_1 \cdot U_{1\phi}^2}{2\omega_1} \cdot \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) = \frac{3 \cdot 3464^2}{2 \cdot 52,4} \cdot \left(\frac{1}{41,4} - \frac{1}{89} \right) = 4384 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

9) Результаты расчетов моментов для ряда значений угла нагрузки сведены в таблице 45.

$\theta, ^\circ$	20	30	45	60	70	90
$\sin \theta$	0,342	0,500	0,707	0,866	0,939	1,000
$M_{\text{осн}} = M_{\text{осн.max}} \cdot \sin \theta$	3797	5551	7851	9617	10436	11108
$\sin 2\theta$	0,643	0,866	1,000	0,867	0,644	0,000
$M_{\text{р}} = M_{\text{р.max}} \cdot \sin 2\theta$	2817	3795	4384	3799	2822	0
$M = M_{\text{осн}} + M_{\text{р}}$	6614	9347	12235	13416	13258	11108

10) По результатам расчетов построены угловые характеристики (рис.34)

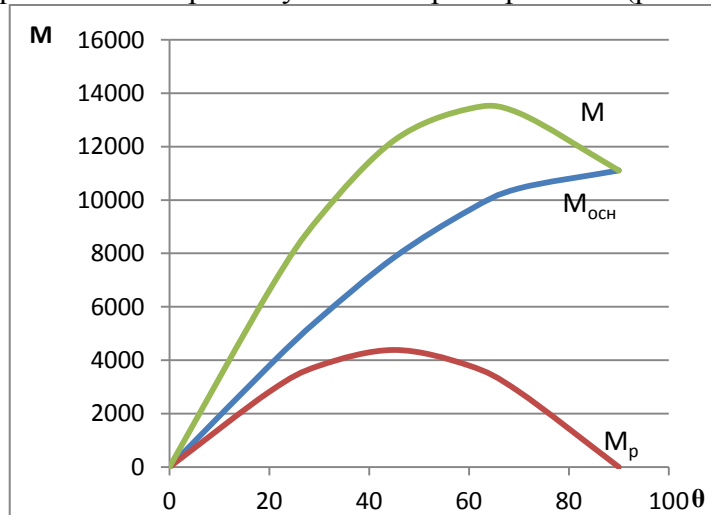


Рисунок 34. Угловые характеристики СГ

Расчетно-графическое задание № 25.

Тема: «Угловая характеристика синхронного генератора»

Задание:

Явнополюсный синхронный генератор имеет данные, указанные в табл.46.

Требуется:

Расчитать значение электромагнитных моментов и построить угловые характеристики генератора

Таблица 46 (по последней цифре варианта)

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
S_n , кВА	44	56	75	80	500	625	1250	1500	90000	124000
U_1 , В	230	400	400	400	400	6300	6300	6000	13800	13800
D_1 , м	0,8	0,92	0,86	0,8	1,0	0,85	0,82	1,1	0,9	0,85
l_1 , м	0,55	0,25	0,35	0,5	0,5	0,3	0,32	0,54	0,56	0,44
x_d , Ом	0,84	0,88	0,88	0,92	0,83	0,84	0,85	0,84	0,84	0,84
x_q , Ом	0,48	0,4	0,42	0,53	0,51	0,49	0,46	0,47	0,5	0,49
$\theta_{ном}$, °	14	16	15	17	22	20	18	19	21	16
$2p$	10	8	10	8	12	10	12	10	12	12
w_1	210	330	360	290	220	340	350	400	810	740

$\Phi, \text{Вб}$	0,0052	0,0054	0,0046	0,0064	0,0074	0,056	0,058	0,057	0,062	0,077
-------------------	--------	--------	--------	--------	--------	-------	-------	-------	-------	-------

Примечания: соединение обмоток – «звезда»; $k_{obl}=0,92$; $k_c=0,95$.

12. Практическая диаграмма синхронного генератора

Изменение напряжения синхронного генератора при сбросе нагрузки $\Delta U_{\text{ном}}$ можно определить графически – путем построения практической диаграммы ЭДС.

Порядок построения практической диаграммы ЭДС (рис.35):

1) Строим нормальную характеристику холостого хода в относительных единицах $E_0^* = f(I_B^*)$ по данным таблицы 47.

Таблица 47.

E_0^*	0,58	1,0	1,21	1,33	1,4	1,46	1,51
I_B^*	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5

2) В этих же осях строим характеристику короткого замыкания в относительных единицах $I_K^* = f(I_B^*)$ по двум точкам: начало осей координат (точка О) и точка с координатами $I_K^* = 1$ и $I_{B,K.ном}^* = \frac{1}{OK_3}$.

3) На оси ординат строим вектор $U_{1ном}^* = 1$ и под углом $\varphi_{1ном}$ проводим линию – направление тока статора, на которой строим вектор $I_{1ном}^* = 1$, для чего деление 1 с оси ординат посредством циркуля переносим на линию направления тока.

4) Из конца вектора напряжения $U_{1ном}^*$ под углом 90° к направлению тока статора проводим вектор ЭДС рассеяния $E_{1\sigma}^*$.

5) Соединив точку начала координат с концом вектора $E_{1\sigma}^*$ получим вектор ЭДС нагруженного генератора $E_{нг}^*$.

6) Проектируем конец вектора $E_{нг}^*$ на характеристику холостого хода и получаем отрезок ВС, который затем проектируем на ось абсцисс и определяем величину тока возбуждения I_B^* , соответствующий ЭДС нагруженного генератора.

7) На оси ординат в точке О строим вектор $E_{1\sigma}^*$, полученную точку Н переносим на характеристику холостого хода, а затем на ось абсцисс и получим значение тока возбуждения $I_{B.X}^*$, эквивалентного ЭДС рассеяния.

8) Величина тока возбуждения $I_{B.d}^*$, соответствующая продольно-размагничивающей реакции якоря определяется отрезком LG.

9) Из точки D под углом $\varphi_1' = \gamma + \varphi_{1ном}$ к вертикали CD строим вектор DM = $I_{B.d}^*$. затем из точки О радиусом OM описываем дугу до пересечения с осью абсцисс в точке N. Полученный отрезок ON представляет собой ток возбуждения $I_{B0.ном}^*$, соответствующий основной ЭДС генератора.

10) Проектируем точку N на характеристику холостого хода, а затем на ось ординат, и получаем основную ЭДС генератора E_0^* .

11) Используя полученные в результате построения данные определяем номинальное изменение напряжения при сбросе нагрузки

$$\Delta U_{\text{ном}} = \frac{E_0^* - U_{1ном}^*}{U_{1ном}^*}$$

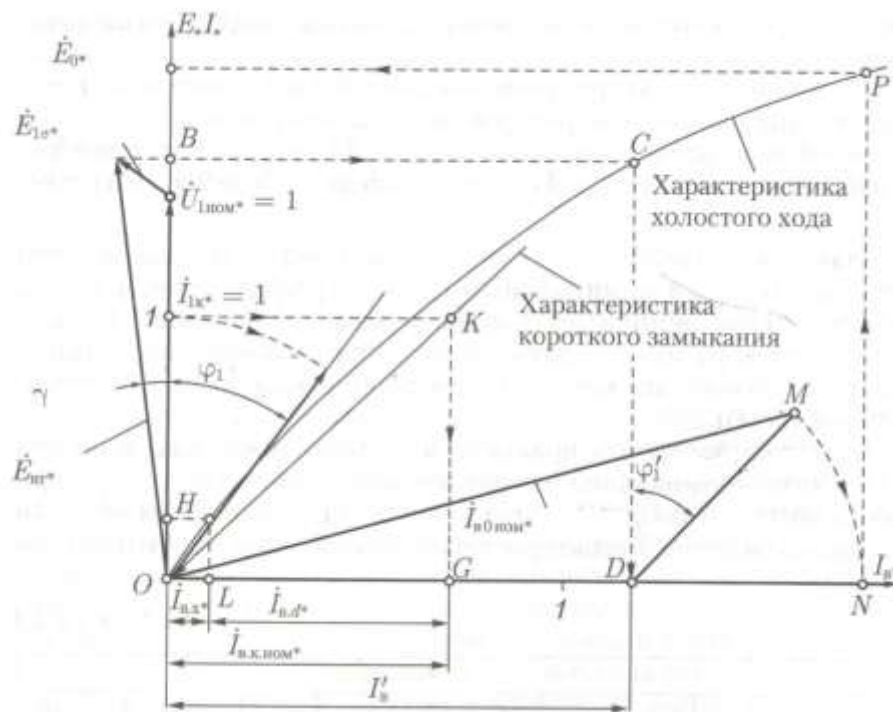


Рисунок 35. Практическая диаграмма синхронного генератора.

Пример № 32.

Трехфазный симметричный генератор номинальной мощностью $S_{\text{ном}} = 55 \text{ кВА}$ и номинальным (фазным) напряжением $U_{1\text{ф.ном}} = 230 \text{ В}$ работает с коэффициентом мощности $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,8$ (инд.). Обмотка фазы статора имеет индуктивное сопротивление рассеяния $x_1 = 0,15 \text{ Ом}$. Отношение короткого замыкания $\text{ОКЗ} = 1,4$. Частота переменного тока 50 Гц .

Требуется построить практическую диаграмму ЭДС и по ней определить номинальное изменение напряжения генератора при сбросе нагрузки $\Delta U_{\text{ном}}$. Активным сопротивлением фазы обмотки пренебречь. Характеристика холостого хода генератора нормальная.

Решение:

- 1) Номинальный ток статора

$$I_{1\text{ном}} = \frac{S_{\text{ном}}}{m_1 \cdot U_{1\text{ном}} \cdot \cos \varphi_{\text{ном}}} = \frac{55 \cdot 10^3}{3 \cdot 230 \cdot 0,8} = 99,64 \text{ А}$$

- 2) Индуктивное падение напряжения

$$E_{1\sigma} = j I_{1\text{ном}} \cdot x_1 = j 99,64 \cdot 0,15 = j 15 \text{ В}$$

или в относительных единицах

$$E_{\sigma}^* = \frac{E_{1\sigma}}{U_{1\text{ном}}} = \frac{j 15}{230} = j 0,065$$

- 3) Строим практическую диаграмму (рис.36):

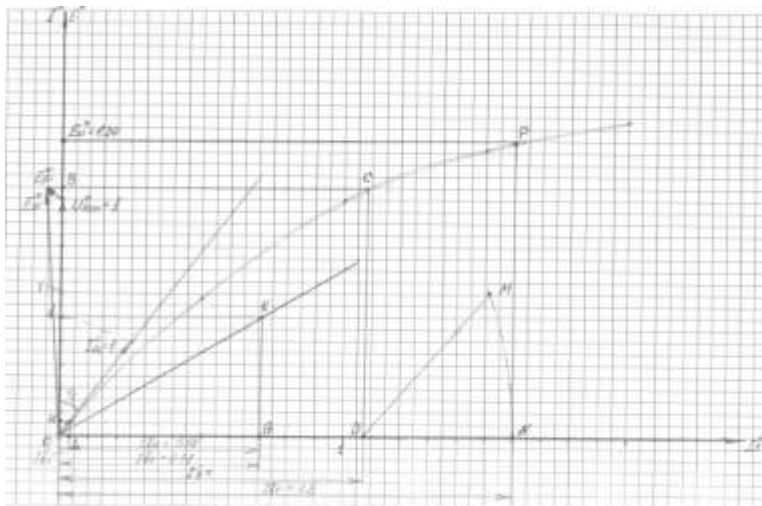


Рисунок 36. Практическая диаграмма ЭДС СГ

3.1) Строим нормальную характеристику холостого хода в относительных единицах $E_0^* = f(I_B^*)$ по данным таблицы 47.

3.2) В этих же осях строим характеристику короткого замыкания в относительных единицах $I_K^* = f(I_B^*)$ по двум точкам: начало осей координат (точка О) и точка с координатами $I_K^* = 1$ и $I_{B.K.ном}^* = \frac{1}{OK3} = \frac{1}{1,4} = 0,71$.

3.3) На оси ординат строим вектор $U_{1ном}^* = 1$ и под углом $\varphi_{1ном}$ проводим линию – направление тока статора, на которой строим вектор $I_{1ном}^* = 1$.

$$\varphi_{1ном} = \arccos 0,8 = 37^\circ$$

3.4) Из конца вектора напряжения $U_{1ном}^*$ под углом 90° к направлению тока статора проводим вектор ЭДС рассеяния $E_{1\sigma}^*$.

3.5) Соединив точку начала координат с концом вектора $E_{1\sigma}^*$ получим вектор ЭДС нагруженного генератора $E_{нг}^*$.

3.6) Проектируем конец вектора $E_{нг}^*$ на характеристику холостого хода и получаем отрезок ВС, который затем проектируем на ось абсцисс и определяем величину тока возбуждения $I_B^* = 1,08$, соответствующий ЭДС нагруженного генератора.

3.7) На оси ординат в точке О строим вектор $E_{1\sigma}^*$, полученную точку Н переносим на характеристику холостого хода, а затем на ось абсцисс и получим значение тока возбуждения $I_{B.X}^* = 0,03$, эквивалентного ЭДС рассеяния.

3.8) Величина тока возбуждения $I_{B.d}^*$, соответствующая продольно-размагничивающей реакции якоря определяется отрезком LG. $I_{B.d}^* = 0,68$

3.9) Из точки D под углом $\varphi_1' = \gamma + \varphi_{1ном} = 4 + 37 = 41^\circ$ к вертикали CD строим вектор DM = $I_{B.d}^* = 0,68$. затем из точки О радиусом OM описываем дугу до пересечения с осью абсцисс в точке N. Полученный отрезок ON представляет собой ток возбуждения $I_{B0.ном}^* = 1,6$, соответствующий основной ЭДС генератора.

3.10) Проектируем точку N на характеристику холостого хода, а затем на ось ординат, и получаем основную ЭДС генератора $E_0^* = 1,24$.

4) Используя полученные в результате построения данные определяем номинальное изменение напряжения при сбросе нагрузки

$$\Delta U_{ном} = \frac{E_0^* - U_{1ном}^*}{U_{1ном}^*} = \frac{1,24 - 1}{1} = 0,24 \text{ или } 24\%$$

Задание:

Трехфазный синхронный генератор имеет данные, указанные в табл.47. и работает с коэффициентом мощности $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,8$ (инд.). Частота переменного тока 50 Гц. Характеристика холостого хода нормальная.

Требуется:

Построить практическую диаграмму ЭДС и по ней определить номинальное изменение напряжения генератора при сбросе нагрузки.

Таблица 47 (по последней цифре варианта)

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
S_n , кВА	64	40	70	95	63	46	57	50	100	80
U_1 , В	230	230	230	400	400	400	400	230	230	230
ОКЗ	1,5	1,2	1,3	1,1	1,4	1,1	1,2	1,3	1,2	1,4
x_1 , Ом	0,2	0,32	0,45	0,32	0,28	0,25	0,18	0,32	0,32	0,18

13. Параметры синхронного двигателя

Синхронная машина обладает свойством обратимости и может, при параллельной работе с сетью, переходить из генераторного режима в двигательный и наоборот. Изменение режима работы синхронной машины связано с изменением угла нагрузки θ .

Если на валу синхронной машины создать тормозной момент, то ось ротора будет отставать от оси результирующего магнитного поля на угол θ , который становится отрицательным. Электромагнитный момент, возникающий в синхронной машине, будет движущим, т.е. направлен в сторону вращения ротора. Ведущим является магнитное поле статора; ведомым – ротор. Электрическая мощность, подводимая к обмотке статора, преобразуется в механическую, которая с вала передается рабочему механизму.

Пример № 33.

Трехфазный синхронный двигатель имеет следующие данные: номинальная мощность $P_{\text{ном}} = 500$ кВт, число полюсов $2p = 12$, КПД $\eta_{\text{ном}} = 93,7\%$, кратности - пускового тока $I_{\text{п}}/I_{\text{ном}} = 5,2$, пускового момента $M_{\text{п}}/M_{\text{ном}} = 1$, максимального синхронного момента $M_{\text{max}}/M_{\text{ном}} = 1,9$, асинхронного момента при скольжении $s = 5\%$ $M_{5\%}/M_{\text{ном}} = 1,3$ (момент на входе в синхронизм), соединение обмоток статора «звездой». Напряжение питающей сети $U_c = 10$ кВ при частоте 50 Гц, коэффициент мощности $\cos \varphi_1 = 0,8$.

Определить частоту вращения, номинальный и пусковой токи в цепи статора, номинальный, максимальный синхронный, пусковой моменты и асинхронный момент входа в синхронизм.

Решение:

- 1) Частота вращения

$$n_1 = \frac{60 \cdot f}{p} = \frac{60 \cdot 50}{6} = 500 \text{ об/мин}$$

- 2) Потребляемая двигателем мощность в режиме номинальной нагрузки

$$P_{1\text{ном}} = \frac{P_{\text{ном}}}{\eta_{\text{ном}}} = \frac{500 \cdot 10^3}{0,937} = 533618 \text{ Вт} \approx 534 \text{ кВт}$$

- 3) Ток в цепи статора в режиме номинальной нагрузки

$$I_{1\text{ном}} = \frac{P_{1\text{ном}}}{\sqrt{3} \cdot U_1 \cdot \cos \varphi_1} = \frac{533618}{\sqrt{3} \cdot 10 \cdot 10^3 \cdot 0,8} = 38,5 \text{ А}$$

- 4) Пусковой ток в цепи статора

$$I_{\text{п}} = I_{1\text{ном}} \cdot \frac{I_{\text{п}}}{I_{1\text{ном}}} = 38,5 \cdot 5,2 = 200 \text{ А}$$

- 5) Момент на валу двигателя в режиме номинальной нагрузки

$$M_{\text{ном}} = 9,55 \cdot \frac{P_{\text{ном}}}{n_1} = 9,55 \cdot \frac{500 \cdot 10^3}{500} = 9550 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

6) Максимальный (синхронный) момент

$$M_{max} = M_{ном} \cdot \frac{M_{max}}{M_{ном}} = 9550 \cdot 1,9 = 18145 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

7) Пусковой момент

$$M_{п} = M_{ном} \cdot \frac{M_{п}}{M_{ном}} = 9550 \cdot 1 = 9550 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

8) Момент входа в синхронизм

$$M_{5\%} = M_{ном} \cdot \frac{M_{5\%}}{M_{ном}} = 9550 \cdot 1,3 = 12415 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Расчетно-графическое задание № 27.

Тема: «Расчет параметров синхронного двигателя»

Задание:

Трехфазный синхронный двигатель имеет данные, указанные в табл.48. Соединение обмоток статора «звездой».

Требуется:

Определить:

- частоту вращения;

- номинальный и пусковой токи в цепи статора;

- номинальный, максимальный синхронный, пусковой моменты и момент входа в синхронизм (при $s = 5\%$).

Таблица 48 (по третьей цифре варианта)

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$P_{ном}, \text{ кВт}$	600	800	1000	1250	2500	630	800	1250	1600	600
$U_{I_{ном}}, \text{ кВ}$	6,3	6,3	10	10	10	6,3	10	6,3	10	10
$\eta_{ном}, \%$	94,2	94,3	94,9	95,3	96,2	94,4	94,9	95,5	95,9	94
$2p$	12	12	12	12	12	10	10	10	10	10
$\cos \varphi_{I_{ном}}$	0,88	0,8	0,85	0,9	0,86	0,92	0,87	0,9	0,92	0,85
$\frac{M_{max}}{M_{ном}}$	1,9	1,9	1,8	1,9	1,8	1,8	1,8	1,9	1,8	1,8
$\frac{M_{5\%}}{M_{ном}}$	1,3	1,1	1	1,2	1,4	1,4	1,3	1,2	1,2	1,1
$\frac{M_{п}}{M_{ном}}$	1	1	1	1,1	1,2	0,75	0,75	1,1	1	1,1
$\frac{I_{п}}{I_{ном}}$	5,1	4,7	4,5	5,2	6,5	5	5	5,4	5,2	5

14. Рабочие характеристики синхронного двигателя

Рабочими характеристиками называются зависимости $P_1, I_1, \cos \varphi_1$ и $\eta(P_2)$ при $U = U_{ном} = \text{const}$; $f_1 = f_{ном} = \text{const}$; $i_b = \text{const}$. Они представлены на рис. 37 в относительных единицах.

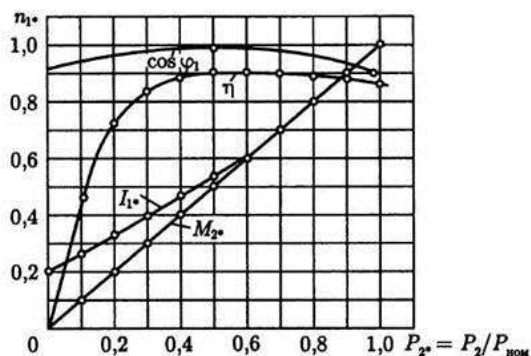


Рисунок 37. Рабочие характеристики трехфазного синхронного двигателя

Пример № 34.

Для трехфазного синхронного двигателя номинальной мощностью $P_{\text{ном}} = 132 \text{ кВт}$ и напряжением питания $U_1 = 0,38 \text{ кВ}$ при частоте 50 Гц , с числом полюсов $2p = 12$, пользуясь рабочими характеристиками в относительных единицах (рис.37), определить: полную S , активную P_1 и реактивную Q мощности, КПД η , коэффициент мощности $\cos \varphi_1$ и момент на валу двигателя M_2 при нагрузках, соответствующих наибольшему значению коэффициента мощности и наибольшему значению КПД.

Решение:

- 1) Режиму номинальной нагрузки двигателя $P_2^* = 1$ соответствуют следующие номинальные значения параметров: коэффициент мощности $\cos \varphi_{1\text{ном}} = 0,89$, КПД $\eta_{\text{ном}} = 86 \%$. Используя эти величины, определим:

а) номинальный ток статора

$$I_{1\text{ном}} = \frac{P_{\text{ном}}}{\sqrt{3} \cdot U_1 \cdot \eta_{\text{ном}} \cdot \cos \varphi_1} = \frac{132 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 0,38 \cdot 10^3 \cdot 0,86 \cdot 0,89} = 262 \text{ А}$$

б) номинальный момент на валу двигателя

$$M_{\text{ном}} = 9,55 \cdot \frac{P_{\text{ном}}}{n_1} = 9,55 \cdot \frac{132 \cdot 10^3}{500} = 2521 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$\text{где } n_1 = \frac{60 \cdot f}{p} = \frac{60 \cdot 50}{6} = 500 \text{ об/мин}$$

- 2) Из рабочих характеристик двигателя следует, что наибольшее значение коэффициента мощности $\cos \varphi_{1\text{max}} = 0,98$ соответствует нагрузке $P_{21}^* = 0,5$, т.е. полезной мощности двигателя

$$P_{21} = 0,5 \cdot P_{\text{ном}} = 0,5 \cdot 132 \cdot 10^3 = 66 \cdot 10^3 \text{ Вт} = 66 \text{ кВт};$$

а наибольшее значение КПД $\eta_{\text{max}} = 90 \%$ соответствует нагрузке $P_{22}^* = 0,6$, т.е. полезной мощности двигателя

$$P_{22} = 0,6 \cdot P_{\text{ном}} = 0,6 \cdot 132 \cdot 10^3 = 79,2 \cdot 10^3 \text{ Вт} = 79,2 \text{ кВт}$$

- 3) Указанным значениям нагрузки соответствуют значения (см.рис.37):

а) токов статора:

$$I_{11} = 0,52 \cdot I_{1\text{ном}} = 0,52 \cdot 262 = 136 \text{ А};$$

$$I_{12} = 0,61 \cdot I_{1\text{ном}} = 0,61 \cdot 262 = 160 \text{ А};$$

б) полной мощности:

$$S_1 = \sqrt{3} \cdot U_1 \cdot I_{11} = \sqrt{3} \cdot 0,38 \cdot 10^3 \cdot 136 = 89512 \text{ ВА} \approx 89,5 \text{ кВА}$$

$$S_2 = \sqrt{3} \cdot U_1 \cdot I_{12} = \sqrt{3} \cdot 0,38 \cdot 10^3 \cdot 160 = 105309 \text{ ВА} \approx 105 \text{ кВА}$$

в) коэффициента мощности:

$$\cos \varphi_{11} = \cos \varphi_{1\text{max}} = 0,98; \sin \varphi_{11} = 0,199$$

$$\cos \varphi_{12} = 0,97; \sin \varphi_{11} = 0,243$$

г) реактивной мощности:

$$Q_1 = S_1 \cdot \sin \varphi_{11} = 89512 \cdot 0,199 = 17813 \text{ вар} \approx 17,8 \text{ квар}$$

$$Q_2 = S_2 \cdot \sin \varphi_{12} = 105309 \cdot 0,242 = 25485 \text{ вар} \approx 25,5 \text{ квар}$$

д) активной потребляемой мощности:

$$P_{11} = S_1 \cdot \cos \varphi_{11} = 89512 \cdot 0,98 = 87722 \text{ Вт} \approx 88 \text{ кВт}$$

$$P_{12} = S_2 \cdot \cos \varphi_{12} = 105309 \cdot 0,97 = 102150 \text{ Вт} \approx 102 \text{ кВт}$$

е) моменты на валу двигателя

$$M_{21} = 0,5 \cdot M_{\text{ном}} = 0,5 \cdot 2521 = 1260,5 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{22} = 0,6 \cdot M_{\text{ном}} = 0,6 \cdot 2521 = 1513 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

Расчетно-графическое задание № 28.

Тема: «Рабочие характеристики синхронного двигателя»

Задание:

Трехфазный синхронный двигатель имеет данные, указанные в табл.49. Соединение обмоток статора «звездой».

Требуется:

Пользуясь рабочими характеристиками в относительных единицах (рис.37) определить:

- полную, активную и реактивную мощности;
- КПД;
- коэффициент мощности;
- момент на валу двигателя.

Все параметры определить при нагрузках, соответствующих наибольшему значению коэффициента мощности и наибольшему значению КПД.

Таблица 49 (по третьей цифре варианта)

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$P_{ном}, \text{кВт}$	200	315	630	400	250	500	315	128	220	540
$U_{Iном}, \text{кВ}$	0,38	6	6	6	0,38	6	0,38	0,38	0,38	6
$2p$	12	8	6	8	10	8	10	12	10	8

Список использованных источников

1. Вольдек А. И. Электрические машины: Учебник для вузов. – Л.: Энергия, 1974. – 840 с.
2. Иванов-Смоленский А. В. Электрические машины: Учебник для вузов. – М.: Энергия, 1980. – 928 с.
3. Кацман М.М. Сборник задач по электрическим машинам: учеб.пособие для студ. учреждений сред.проф.образования.- 5-е изд., стер. – М.: Издательский центр «Академия», 2009. – 160с.
4. Кацман, М.М. Электрические машины: Учеб.для студентов сред.проф.учебных заведений. – 3-е изд., испр. – М.: Высшая школа; Издательский центр «Академия», 2008 – 463с.
5. Кононенко Е. В., Королев Н. И., Махначев П. П. Электрические машины. Вопросы для программного обучения. Учебное пособие. Воронеж: Изд-во ВГУ, 1996. – 192 с.
6. Кононенко Е.В. Электрические машины переменного тока: Учеб.пособие / Кононенко Е.В., Волчихин В.И., Писаревский Ю.В.; Под ред. Е.В. Кононенко. Воронеж: Изд-во ЦНТИ, 2001. 202с.
7. Кононенко Е.В. Электрические машины постоянного тока и трансформаторы: Учеб.пособие. Воронеж: Изд-во ЦНТИ, 2001. 146с.
8. Копылов И. П. Электрические машины: Учебник для вузов. – М.: Высшая школа; Логос, 2000. – 607 с.
9. Костенко М. П., Пиотровский Л. М. Электрические машины. Часть 1, 2. – Л.: Энергия, 1972 - 1973.- 544, 648 с.
10. Сергеевков Б. Н., Киселев В. М., Акимова Н. А. Электрические машины. Трансформаторы: Учебное пособие для вузов / Под ред. И. П. Копылова. - М.: Высшая школа, 1989. – 352 с.
11. Сипайлов Г. А., Кононенко Е. В., Хорьков К. А. Электрические машины (специальный курс). – М.: Высшая школа, 1987. – 287 с.
12. Справочник по электрическим машинам: В 2 т. / Под общей ред. И. П. Копылова и Б. К. Клокова. – М.: Энергоатомиздат, 1988 – 1989. – 456 - 688 с.
13. Справочник электрика. – 4-е изд., исправл. и доп. – М.: ИП РадиоСофт, 2010. – 512с.: ил.
14. Токарев Б. Ф. Электрические машины: Учебное пособие для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1990. – 624 с.