

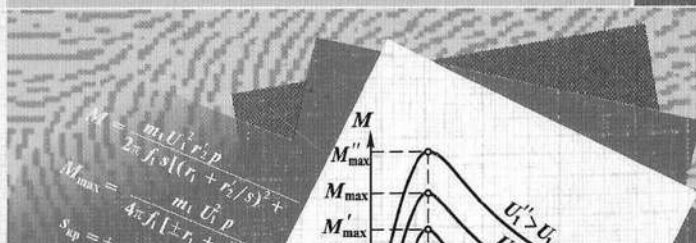
М. М. Кацман

СБОРНИК ЗАДАЧ ПО ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ МАШИНАМ

4-е издание

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

ACADEMIA



УДК 621.313
ББК 31.26
К30

Рецензенты:

канд. техн. наук, доц. кафедры «Автоматизация и информатизация»
Московского технического университета связи и информатики *Ю. М. Келим*;
преподаватель Отраслевого автомобильного колледжа *И. С. Туревский*

Кацман М. М.

К30 Сборник задач по электрическим машинам : учеб. пособие для студ. учреждений сред. проф. образования / М. М. Кацман. — 4-е изд., стер. — М. : Издательский центр «Академия», 2008. — 160 с.

ISBN 978-5-7695-5273-1

В сборнике приведены задачи и примеры их решения по всем темам предмета «Электрические машины». Задачи представлены в пяти — десяти вариантах, что облегчает их применение при выполнении контрольных работ и домашних заданий. В каждой задаче приводится подробное решение одного из вариантов. Книга содержит справочный материал, необходимый для самостоятельной работы студентов.

Для студентов учреждений среднего профессионального образования. Может быть использовано студентами высших учебных заведений.

УДК 621.313
ББК 31.26

*Оригинал-макет данного издания является собственностью
Издательского центра «Академия», воспроизведение его любым способом
без согласия правообладателя запрещается*

© Кацман М. М., 2006

© Образовательно-издательский центр «Академия», 2006

© Оформление. Издательский центр «Академия», 2006

ISBN 978-5-7695-5273-1

ПРЕДИСЛОВИЕ

Книга представляет собой учебное пособие для студентов учреждений среднего профессионального образования, обучающихся по специальностям, в которых предусмотрено изучение предмета «Электрические машины».

Основное назначение книги — оказать помощь студентам в практическом применении теоретических знаний для решения задач по расчету параметров и режимов работы электрических машин и трансформаторов. В книге систематизированы типовые задачи по всему курсу предмета «Электрические машины» в соответствии с действующими учебными программами. Задачи составлены на базе реальных электрических машин и трансформаторов современных серий, что придает им определенную практическую направленность.

В начале каждой главы книги приведены основные понятия, расчетные формулы и уравнения соответствующего раздела предмета.

Каждая задача составлена в нескольких (обычно в десяти) вариантах. При этом по одному из вариантов этих задач приводится подробное решение с рекомендациями и указаниями по выбору параметров, в том числе по выполнению требуемых схем, таблиц, векторных диаграмм, графиков.

При пользовании учебным пособием необходимо иметь в виду, что оно не заменяет учебника и для успешного решения предлагаемых задач требуется систематическое изучение предмета по основному учебнику «Электрические машины» [2]. Задачи в каждой главе расположены в порядке нарастания их сложности. Книга незаменима для желающих самостоятельно освоить учебный материал предмета.

Учебное пособие может быть использовано студентами при выполнении как классных контрольных работ, так и домашних заданий.

Автор весьма признателен канд. техн. наук Ю. М. Келиму и И. С. Туревскому за полезные советы, данные ими при рецензировании книги.

ОСНОВНЫЕ БУКВЕННЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ, ПРИНЯТЫЕ В КНИГЕ

- A — линейная нагрузка машины постоянного тока
 a — число пар параллельных ветвей в обмотке якоря машины постоянного тока; число параллельных ветвей в обмотке машины переменного тока
 $2a$ — число параллельных ветвей в обмотке якоря машины постоянного тока
 $B; B_\delta$ — магнитная индукция; магнитная индукция в воздушном зазоре
 C — электрическая емкость
 $D; D_1, D_2$ — диаметр; диаметры статора и ротора
 E — электродвижущая сила (ЭДС)
 E_a — ЭДС якоря машины постоянного тока
 E_1, E_2 — ЭДС первичной и вторичной обмоток трансформатора; ЭДС фазы обмоток статора и ротора машины переменного тока
 E_0 — основная ЭДС синхронной машины
 $E_{\sigma 1}, E_{\sigma 2}$ — ЭДС рассеяния первичной и вторичной обмоток
 E_{2s} — ЭДС скольжения
 E_{20} — ЭДС, измеренная на контактных кольцах неподвижного ротора асинхронного двигателя
 F — магнитодвижущая сила (МДС), магнитное напряжение
 $F_\delta; F_z; F_c$ — магнитное напряжение воздушного зазора, зубцового слоя, спинки электрической машины
 f — частота переменного тока в обмотках трансформатора
 $f_1; f_2$ — частота переменного тока в обмотках статора и ротора соответственно
 f_s — частота скольжения асинхронного двигателя
 H — напряженность магнитного поля
 $I; I_{\max}; i$ — электрический ток: действующее, максимальное и мгновенное значения
 I_1, I_2 — ток в первичной и вторичной обмотках трансформатора; ток в фазах обмоток статора и ротора машины переменного тока
 $I_{\text{п}}$ — пусковой ток асинхронного двигателя
 $I_0; I_{\text{к}}$ — токи холостого хода и короткого замыкания
 I_* — относительное значение тока
 K — количество коллекторных пластин коллектора машины постоянного тока
 k — коэффициент трансформации трансформатора
 k_{Λ} — коэффициент трансформации автотрансформатора
 $k_{\text{об}}$ — обмоточный коэффициент

- k_p — коэффициент распределения обмотки машины переменного тока
 k_y — коэффициент укорочения обмотки машины переменного тока
 $k_{ск}$ — коэффициент скоса пазов
 k_y — коэффициент усиления
 k_m — коэффициент магнитного насыщения магнитопровода
 L — коэффициент индуктивности
 l_1, l_2 — длина сердечников статора и ротора
 M — электромагнитный момент электрической машины
 M_0 — момент холостого хода
 M_2 — момент на валу двигателя
 $M_{осн}, M_D$ — основная и реактивная составляющие электромагнитного момента синхронной явнополюсной машины
 m_1, m_2 — число фаз в обмотке статора и ротора
 N — количество пазовых сторон в обмотке электрической машины
 n — частота вращения
 n_1 — синхронная частота вращения ротора машины переменного тока
 n_2 — частота вращения ротора асинхронного двигателя
 n_0 — частота вращения в режиме холостого хода
 n_{00} — частота вращения в режиме идеального холостого хода
 P — активная мощность
 P_1, P_2 — активная мощность на входе и выходе электрического устройства
 P_0, P_K — мощности холостого хода и короткого замыкания электрического устройства
 $P_M, P_{мех}, P_{э}, P_{доб}$ — мощность магнитных, механических, электрических и добавочных потерь
 p — количество пар полюсов в электрической машине
 $2p$ — количество полюсов в электрической машине
 Q — реактивная мощность
 $Q_{ск}$ — мощность синхронного компенсатора
 q_1, q_2 — количество пазов на полюс и фазу статора и ротора электрической машины переменного тока
 R — электрическое сопротивление активное
 $R_{ном}$ — номинальное сопротивление двигателя
 $R_{пр}$ — сопротивление пускового реостата
 r_1 — активное сопротивление первичной обмотки трансформатора, фазной обмотки статора машины переменного тока
 r_2 — активное сопротивление вторичной обмотки трансформатора или фазной обмотки ротора
 r'_2 — то же, но приведенное к параметрам первичной цепи
 r_m — активное сопротивление ветви намагничивания электрической схемы замещения трансформатора и асинхронного двигателя
 $r_{доб}$ — сопротивление добавочного резистора
 r_B — сопротивление обмотки возбуждения
 r_a — сопротивление обмотки якоря
 $r_{д.л}$ — сопротивление обмотки добавочных полюсов
 r_K — активное сопротивление электрического устройства в режиме короткого замыкания
 S — полная электрическая мощность

- S_1 — полная мощность в первичной цепи трансформатора или обмотке статора
 S_2 — полная мощность во вторичной цепи трансформатора
 s — скольжение асинхронной машины
 $s_{кр}$ — критическое скольжение
 T — постоянная времени
 t — время
 $U, U_{max}; u$ — электрическое напряжение: действующее, максимальное и мгновенные значения
 $U_1; U_2$ — напряжение на зажимах первичной и вторичной обмоток трансформатора либо обмоток статора и ротора машины переменного тока
 U'_2 — напряжение во вторичной цепи трансформатора или ротора асинхронного двигателя, приведенное к параметрам первичной цепи или статора
 U_B — напряжение, подведенное к цепи обмотки возбуждения электрической машины
 U_K — напряжение между смежными коллекторными пластинами
 U_L — линейное напряжение трехфазной сети
 $U_{ном}$ — номинальное значение напряжения
 v — линейная скорость
 w — число витков обмотки (катушки) электрического устройства
 $w_1; w_2$ — число витков первичной и вторичной обмоток трансформатора либо обмотки статора и ротора машины переменного тока
 w_B — число витков обмотки возбуждения
 $w_{кат}$ — число витков катушки обмотки статора или ротора асинхронной машины
 $w_{д.п}$ — число витков обмотки добавочных полюсов
 w_n — число витков последовательной обмотки возбуждения
 x — реактивное сопротивление
 x_1 — индуктивное сопротивление первичной обмотки трансформатора либо обмотки статора машины переменного тока
 x_2 — индуктивное сопротивление вторичной обмотки трансформатора либо обмотки ротора машины переменного тока
 x'_2 — то же, но приведенное к параметрам первичной цепи
 x_m — индуктивное сопротивление ветви намагничивания схемы замещения трансформатора либо асинхронного двигателя
 x_a — индуктивное сопротивление реакции якоря неявнополусной синхронной машины
 x_c — синхронное сопротивление неявнополусной синхронной машины
 $x_{ад}, x_{aq}$ — индуктивное сопротивление реакции якоря явнополусной синхронной машины по продольной и поперечной осям
 x_d, x_q — синхронные индуктивные сопротивления явнополусной синхронной машины по продольной и поперечной осям
 x_k — индуктивное сопротивление электрического устройства в режиме короткого замыкания
 $y_1; y_2; y$ — первый, второй и результирующий шаги обмотки якоря

- y_k — шаг обмотки по коллектору
- y_{yp} — потенциальный шаг обмотки якоря
- z — полное электрическое сопротивление
- z_2 — полное сопротивление первичной и вторичной обмоток трансформатора либо обмоток статора и ротора машины переменного тока
- z'_2 — полное сопротивление вторичной цепи, приведенное к параметрам первичной цепи
- z_k — полное сопротивление электрического устройства в режиме короткого замыкания
- α — температурный коэффициент электрического сопротивления
- β — относительный шаг обмотки переменного тока
- β — коэффициент нагрузки электрического устройства
- θ — угол нагрузки синхронной машины
- θ_1 — температура нагрева обмотки электрического устройства
- θ_2 — температура окружающей среды
- τ — полюсное деление обмотки
- δ — односторонний воздушный зазор между статором и ротором (якорем) электрической машины
- Δ — плотность тока в проводе
- η — коэффициент полезного действия электрического устройства
- λ — кратность (отношение) моментов либо токов электрической машины
- ρ — удельное электрическое сопротивление проводника
- σ — коэффициент магнитного рассеяния
- Φ — основной магнитный поток
- Φ_σ — магнитный поток рассеяния
- φ — угол сдвига фаз между векторами тока и напряжения
- Ψ — угол сдвига фаз между векторами тока и ЭДС
- ω — угловая скорость вращения
- ΣP — суммарные потери в электрическом устройстве

ТРАНСФОРМАТОРЫ

1.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

В процессе работы однофазного двухобмоточного трансформатора в его магнитопроводе наводится переменный магнитный поток (рис. 1.1). Основная часть этого потока $\Phi_{\max}$ (максимальное значение), сцепляясь с обмотками трансформатора, индуцирует в них переменные ЭДС, действующие значения которых равны:

первичная ЭДС

$$E_1 = 4,44 \Phi_{\max} f_1 w_1;$$

вторичная ЭДС

$$E_2 = 4,44 \Phi_{\max} f_1 w_2,$$

где f_1 — частота переменного тока, Гц; w_1 и w_2 — число витков в первичной и вторичной обмотках трансформатора.

Максимальное значение основного магнитного потока, Вб,

$$\Phi_{\max} = B_{\max} Q_{\text{ст}} k_c,$$

где $B_{\max}$ — максимальное значение магнитной индукции в стержне магнитопровода, Тл; $Q_{\text{ст}}$ — площадь поперечного сечения стержня трансформатора, м²; k_c — коэффициент заполнения магнитопровода сталью, который учитывает толщину изоляционных прослоек

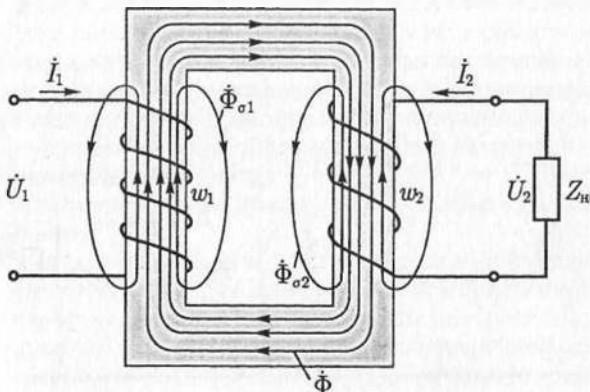


Рис. 1.1. Однофазный двухобмоточный трансформатор

между пластинами электротехнической стали, при толщине пластин 0,5 мм обычно принимают $k_c = 0,95$.

Различие в значениях ЭДС E_1 и E_2 вызвано неодинаковым числом витков в первичной w_1 и во вторичной w_2 обмотках трансформатора.

Отношение ЭДС обмотки высшего напряжения к ЭДС обмотки низшего напряжения, равное отношению чисел витков этих обмоток, называют коэффициентом трансформации:

$$k = E_1/E_2 = w_1/w_2.$$

Трансформаторы характеризуются следующими параметрами: полная мощность первичной обмотки, В·А,

$$S_1 = U_1 I_1,$$

где U_1 — первичное напряжение; I_1 — первичный ток; полная мощность вторичной обмотки, В·А,

$$S_2 = U_2 I_2,$$

U_2 — вторичное напряжение; I_2 — вторичный ток.

Так как потери в трансформаторе невелики, то за номинальную полную мощность трансформатора принимают:

$$S_{\text{ном}} = U_{\text{ном}} I_{\text{ном}} \sim U_{2\text{ном}} I_{2\text{ном}}.$$

Трансформатор, у которого параметры вторичной цепи приведены к числу витков первичной обмотки w_1 , называют *приведенным трансформатором*. Такому трансформатору соответствует электрическая схема замещения (рис. 1.2) и основные уравнения:

$$U_1 = (-E_1) + \dot{I}_1 Z_1 = (-E_1) + j\dot{I}_1 x_1 + \dot{I}_1 r_1$$

$$U_2 = E_2' - \dot{I}_2 Z_2' = E_2' - j\dot{I}_2 x_2' - \dot{I}_2 r_2'$$

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + (-\dot{I}_2').$$

Индуктивные сопротивления первичной x_1 и вторичной x_2' обмоток обусловлены потоками рассеяния $\Phi_{\sigma 1}$ и $\Phi_{\sigma 2}$ (см. рис. 1.1).

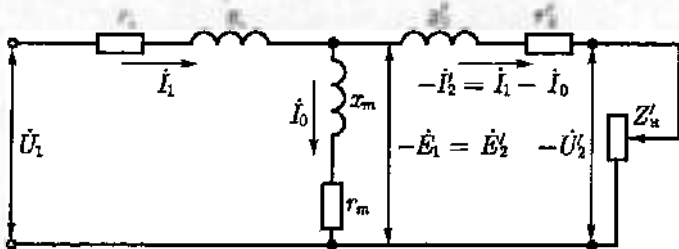


Рис. 1.2. Схема замещения трансформатора

В режиме холостого хода ток в первичной обмотке I_{10} обычно составляет небольшую величину относительно номинального значения этого тока и поэтому падениями напряжения в первичной обмотке можно пренебречь ввиду их незначительности и принять $U_1 \approx (-E_1)$.

На основании схемы замещения и основных уравнений строят векторную диаграмму трансформатора. Угол сдвига фаз между ЭДС и током вторичной обмотки зависит от активного и индуктивного сопротивлений нагрузки трансформатора и определяется выражением

$$\Psi = \operatorname{arctg} X'_2/R'_2,$$

где

$$X'_2 = x'_2 \pm x'_1; R'_2 = r'_2 + r'_1.$$

Знак «плюс» в формуле соответствует индуктивному характеру нагрузки, а знак «минус» — емкостному.

Формулы приведения параметров вторичной цепи:
ток вторичной обмотки

$$I'_2 = I_2(w_2/w_1);$$

ЭДС и напряжение вторичной обмотки

$$E'_2 = E_2(w_1/w_2); U'_2 \approx U_2(w_1/w_2);$$

активное и индуктивное сопротивления вторичной обмотки

$$r'_2 = r_2(w_1/w_2)^2; x'_2 = x_2(w_1/w_2)^2;$$

полное сопротивление вторичной обмотки

$$z'_2 = z_2(w_1/w_2)^2;$$

полное сопротивление нагрузки

$$z'_n = z_n(w_1/w_2)^2.$$

Изменение напряжения на выводах вторичной обмотки трансформатора:

при номинальной нагрузке

$$\Delta U_{\text{ном}} = u_{\text{к.а}} \cos \varphi_2 + u_{\text{к.р}} \sin \varphi_2,$$

где

$$u_{\text{к.а}} = (U_{\text{к.а}}/U_{1\text{ном}}) 100; u_{\text{к.р}} = (U_{\text{к.р}}/U_{1\text{ном}}) 100; u_{\text{к}} = (U_{\text{к}}/U_{1\text{ном}}) 100;$$

при любой нагрузке

$$\Delta U_{\text{ном}} = \beta(u_{\text{к.а}} \cos \varphi_2 + u_{\text{к.р}} \sin \varphi_2),$$

где $\beta = I_2/I_{2\text{ном}}$ — коэффициент нагрузки трансформатора.

КПД трансформатора при любой нагрузке определяется выражением

$$\frac{\beta S_{\text{ном}} \cos \varphi_2}{\beta S_{\text{ном}} \cos \varphi_2 + P_{0\text{ном}} + \beta^2 P_{\text{к.ном}}}$$

где $P_{0\text{ном}}$ — мощность холостого хода трансформатора при номинальном первичном напряжении, равная мощности магнитных потерь, Вт; $P_{\text{к.ном}}$ — мощность короткого замыкания при номинальных токах в обмотках трансформатора, равная мощности электрических потерь, Вт.

Мощность магнитных потерь можно определить через удельные магнитные потери, т.е. магнитные потери в 1 кг электротехнической стали. Для холоднокатаной текстурованной листовой электротехнической стали марки 3411 толщиной 0,5 мм, из которой изготавливается большинство сердечников трансформаторов общего назначения при частоте переменного тока 50 Гц и максимальной магнитной индукции $B_{\text{max}} = 1,5$ Тл, удельные магнитные потери составляют $P_{1,5/50} = 2,45$ Вт/кг.

Электрические потери в обмотках трансформатора при номинальной нагрузке можно определить, если известны значения активных сопротивлений обмоток и номинальные значения токов в обмотках:

$$P_3 = P_{31} + P_{32} = mI_1^2 r_1 + mI_2^2 r_2'.$$

Наибольшее значение КПД соответствует коэффициенту нагрузки

$$\beta' = \sqrt{P_{0\text{ном}} / P_{\text{к.ном}}}$$

который обычно составляет 0,45—0,65.

Максимальный КПД равен

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

При включении нескольких трансформаторов на *параллельную работу* (рис. 1.3) рекомендуется соблюдение следующих условий:

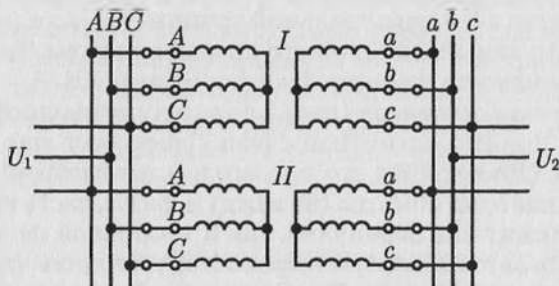


Рис. 1.3. Схема параллельного включения трансформаторов

трансформаторы должны иметь одинаковые коэффициенты трансформации;

трансформаторы должны принадлежать к одной группе соединения;

трансформаторы должны иметь одинаковые напряжения короткого замыкания;

номинальные мощности трансформаторов по своим значениям не должны различаться более чем в три раза.

Нарушение перечисленных условий ведет к возникновению неравномерных токов в цепи обмоток параллельно включенных трансформаторов. Это влияет на распределение нагрузки между трансформаторами. В итоге одни трансформаторы оказываются недогруженными (их нагрузка становится намного меньше номинальной), а другие — перегруженными. Так как перегрузка трансформаторов недопустима, приходится уменьшать общую нагрузку трансформаторов, что ведет к недоиспользованию трансформаторов и снижает их экономические показатели. Но при значительных отклонениях от указанных условий включение на параллельную работу оказывается недопустимым, так как ведет к возникновению аварийной ситуации.

Общая нагрузка параллельно работающих трансформаторов при точном соблюдении всех условий параллельной работы распределяется между ними пропорционально номинальным мощностям этих трансформаторов. Но если параллельно включены трансформаторы различной номинальной мощностью, то их напряжения короткого замыкания, как правило, неодинаковы. С учетом возможного неравенства напряжений короткого замыкания нагрузка любого из параллельно включенных трансформаторов определяется по формуле:

$$S_x = \frac{SS_{\text{ном}}}{u_{\text{кx}} \sum (S_{\text{ном}} / u_{\text{кx}})}$$

где $\sum (S_{\text{ном}} / u_{\text{кx}}) = (S_{\text{I ном}} / u_{\text{кI}}) + (S_{\text{II ном}} / u_{\text{кII}}) + \dots$; S_x — нагрузка одного из параллельно работающих трансформаторов, кВ·А; S — общая нагрузка всей параллельной группы, кВ·А; $u_{\text{кx}}$ — напряжение короткого замыкания данного трансформатора, %; $S_{\text{ном}}$ — номинальная мощность данного трансформатора, кВ·А.

В *автотрансформаторе* (рис. 1.4) между первичной и вторичной цепями помимо магнитной связи существует еще и электрическая связь. Объясняется это тем, что в автотрансформаторе имеется всего лишь одна обмотка (на каждую фазу), часть витков которой принадлежит как первичной, так и вторичной цепям. Расчетная мощность автотрансформатора составляет лишь часть проходной мощности, передаваемой из первичной цепи во вторичную. Другая часть этой мощности передается из первичной во вторич-

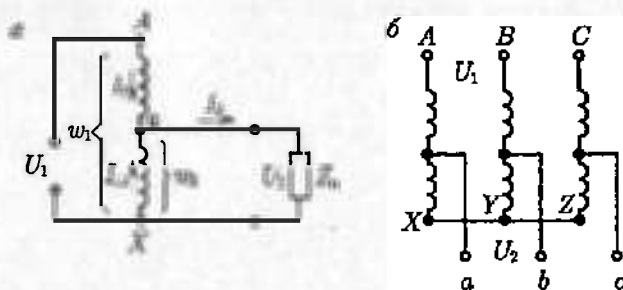


Рис. 1.4. Однофазный (а) и трехфазный (б) автотрансформаторы

ную цепь без участия магнитного поля за счет электрической связи между цепями автотрансформатора:

$$S_{\text{расч}} = U_2 I_2 = U_2 (I_1 - I_0) = U_2 I_1 + U_2 I_0 = S_s + S_{\text{расч}}$$

где $S_s = U_2 I_1$ — мощность, передаваемая из первичной цепи автотрансформатора во вторичную за счет электрической связи между этими цепями; $S_{\text{расч}} = U_2 I_{12}$ — расчетная мощность в автотрансформаторе.

Таким образом, расчетная мощность составляет лишь часть всей мощности, передаваемой из первичной цепи автотрансформатора во вторичную. Это дает возможность для изготовления автотрансформатора использовать магнитопровод меньшего сечения, чем в трансформаторе равной мощности. При этом за счет уменьшенного сечения сердечника средняя длина витка обмотки также становится меньше, а следовательно, сокращается расход меди на выполнение обмотки автотрансформатора. Одновременно уменьшаются магнитные и электрические потери, а КПД автотрансформатора по сравнению с двухобмоточным трансформатором равной мощности повышается.

Таким образом, автотрансформаторы по сравнению с трансформаторами обладают следующими преимуществами: меньшим расходом активных материалов (медь и электротехническая сталь), более высоким КПД, меньшими размерами и, следовательно, меньшей стоимостью.

Указанные преимущества автотрансформаторов тем значительнее, чем больше мощность S_s , передаваемая за счет электрической связи между обмотками, а следовательно, чем меньше расчетная часть $S_{\text{расч}}$ проходной мощности автотрансформатора.

Мощность S_s , передаваемая из первичной во вторичную цепь за счет электрической связи между этими цепями, определяется выражением

$$S_s = U_2 I_1 = U_2 I_2 / k_A = S_{\text{пп}} / k_A,$$

т. е. значение этой мощности обратно пропорционально коэффициенту трансформации автотрансформатора k_A .

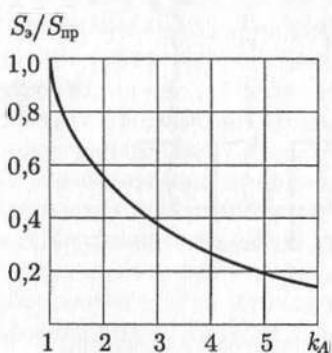


Рис. 1.5. Зависимость $S_3/S_{пр}$ от коэффициента трансформации автотрансформатора

Из графика (рис. 1.5) видно, что применение автотрансформатора дает заметные преимущества по сравнению с двухобмоточным трансформатором лишь при небольших значениях коэффициента трансформации $k_A \leq 2$. Например, при $k_A = 1$ вся мощность автотрансформатора передается во вторичную цепь за счет электрической связи между цепями ($S_3/S_{пр} = 1$). При больших значениях коэффициента трансформации перечисленные достоинства автотрансформаторов уступают его недостаткам. Из них наиболее существенными являются:

малая величина сопротивления короткого замыкания, что является причиной значительных токов короткого замыкания в случае понижающего автотрансформатора;

наличие электрической связи между первичной и вторичной цепями, что ведет к необходимости применения дополнительных защитных мер для обслуживающего персонала и приборов на стороне низкого напряжения от действия высокого напряжения.

1.2. ЗАДАЧИ

Коэффициент трансформации, ЭДС и токи в обмотках, параметры холостого хода и короткого замыкания

Задача 1.1. Однофазный двухобмоточный трансформатор имеет номинальные напряжения: первичное 6,3 кВ, вторичное 0,4 кВ; максимальное значение магнитной индукции в стержне магнитопровода 1,5 Тл; площадь поперечного сечения этого стержня 200 см²; коэффициент заполнения стержня сталью $k_c = 0,95$. Определить число витков в обмотках трансформатора и коэффициент трансформации, если частота переменного тока в сети $f = 50$ Гц.

Решение. Максимальное значение основного магнитного потока

$$\Phi_{\max} = B_{\max} Q_{ст} k_c = 1,5 \cdot 0,02 \cdot 0,95 = 0,0285 \text{ Вб.}$$

Число витков во вторичной обмотке

$$w_2 = U_1 / (4,44 f \Phi_{\max}) = 400 / (4,44 \cdot 50 \cdot 0,0286) = 63 \text{ витка.}$$

Коэффициент трансформации

$$k = U_1 / U_{2\text{ном}} = 6,3 / 0,4 = 15,75.$$

Число витков в первичной обмотке

$$w_1 = w_2 k = 63 \cdot 15,75 = 992 \text{ витка.}$$

Задача 1.2. Используя приведенные в табл. 1.1 значения параметров трехфазных масляных трансформаторов серии ТМ (в обозначении марки в числителе указано номинальная мощность трансформатора в кВ · А, в знаменателе — высшее напряжение в кВ), определить для каждого варианта значения параметров, величины которых не указаны в этой таблице. Обмотки соединены по схемам Y/Y. Частота тока в сети $f = 50$ Гц.

Таблица 1.1

Параметр	Тип трансформатора								
	ТМ-1000/35	ТМ-50/6	ТМ-100/6	ТМ-180/6	ТМ-320/6	ТМ-560/35	ТМГ-750/35	ТМ-1000/6	ТМ-10/6
Основной магнитный поток $\Phi_{\max}$, Вб	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Число витков w_1	1600	1190	—	—	522	2000	—	—	—
Число витков w_2	—	—	72	—	—	—	146	—	—
Сечение стержня магнитопровода $Q_{\text{ст}}$, м ² , при $B_{\max} = 1,5$ Тл	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Напряжение $U_{1\text{ном}}$, кВ	35	6	6	6	6	35	35	6	6
Напряжение $U_{2\text{ном}}$, кВ	—	0,4	0,5	0,5	0,4	—	3,15	0,4	0,4
Коэффициент трансформации k	5,56	—	—	—	—	5,55	—	—	—

Решение варианта с трансформатором ТМ-1000/35.

1. Напряжение на выводах обмотки НН

$$U_{2\text{ном}} = U_{1\text{ном}}/k = 35/5,56 = 6,3 \text{ кВ.}$$

2. Число витков в фазной обмотке НН

$$w_2 = w_1/k = 1600/5,56 = 288 \text{ витков.}$$

3. Максимальное значение основного магнитного потока

$$\Phi_{\max} = U_{2\text{ном}}/(\sqrt{3} \cdot 4,44 f w_2) = 6300/(1,73 \cdot 4,44 \cdot 50 \cdot 288) = 0,057 \text{ Вб.}$$

4. Площадь поперечного сечения стержня магнитопровода

$$Q_{\text{ст}} = \Phi_{\max}/(B_{\max} k_c) = 0,057/(1,5 \cdot 0,95) = 0,04 \text{ м}^2.$$

Задача 1.3. Однофазный двухобмоточный трансформатор номинальной мощностью $S_{\text{ном}}$ и номинальным током во вторичной цепи $I_{2\text{ном}}$ при номинальном вторичном напряжении $U_{2\text{ном}}$ имеет коэффициент трансформации k ; при числе витков в обмотках w_1 и w_2 . Максимальное значение магнитной индукции в стержне B_{max} , а площадь поперечного сечения этого стержня $Q_{\text{ст}}$; ЭДС одного витка $E_{\text{втка}}$; частота переменного тока в сети $f = 50$ Гц. Значения перечисленных параметров приведены в табл. 1.2. Требуется определить не указанные в этой таблице значения параметров для каждого варианта.

Таблица 1.2

Параметр	Варианты				
	1	2	3	4	5
$S_{\text{ном}}$, кВ · А	—	120	—	240	600
$U_{2\text{ном}}$, В	400	630	—	880	660
w_1	—	1800	—	—	—
w_2	—	—	169	128	140
k	15	—	12	23,4	9,55
$E_{\text{втка}}$, В	5	—	6	—	—
$Q_{\text{ст}}$, м ²	—	0,018	—	0,022	—
B_{max} , Тл	1,5	1,4	1,5	—	1,55
$I_{2\text{ном}}$, А	172	—	140	—	—

Решение варианта 1.

1. Максимальное значение основного магнитного потока

$$\Phi_{\text{max}} = E_{\text{втка}} / (4,44fw) = 5 / (4,44 \cdot 50 \cdot 1) = 0,0225 \text{ Вб.}$$

2. Площадь поперечного сечения стержня магнитопровода

$$Q_{\text{ст}} = \Phi_{\text{max}} / (B_{\text{max}}k_c) = 0,0225 / (1,5 \cdot 0,95) = 0,0158 \text{ м}^2.$$

3. Число витков вторичной обмотки

$$w_2 = U_{2\text{ном}} / (4,44f\Phi_{\text{max}}) = 400 / (4,44 \cdot 50 \cdot 0,0225) = 80 \text{ витков.}$$

4. Число витков первичной обмотки

$$w_1 = w_2 k = 80 \cdot 15 = 1200 \text{ витков.}$$

5. Полная номинальная мощность трансформатора

$$S_{\text{ном}} = U_{2\text{ном}} I_{2\text{ном}} = 400 \cdot 172 = 68,8 \text{ кВ} \cdot \text{А.}$$

Задача 1.4. Однофазный трансформатор включен в сеть с частотой тока 50 Гц. Номинальное вторичное напряжение $U_{2\text{ном}}$, а коэффициент трансформации k (табл. 1.3). Определить число витков в обмотках w_1 и w_2 , если в стержне магнитопровода трансформатора сечением $Q_{\text{ст}}$ максимальное значение магнитной индукции B_{max} . Коэффициент заполнения стержня сталью $k_c = 0,95$.

Таблица 1.3

Параметр	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$U_{2\text{ном}}, \text{В}$	230	400	680	230	230	400	400	680	230	230
k	15	10	12	8	10	6	8	12	14	8
$Q_{\text{ст}}, \text{м}^2$	0,049	0,08	0,12	0,18	0,065	0,08	0,12	0,076	0,06	0,085
$B_{\text{max}}, \text{Тл}$	1,3	1,6	1,8	1,3	1,4	1,5	1,2	1,3	1,5	1,2

Решение варианта 1.

1. Максимальное значение основного магнитного потока

$$\Phi_{\text{max}} = B_{\text{max}} Q_{\text{ст}} k_c = 1,3 \cdot 0,049 \cdot 0,95 = 0,06 \text{ Вб.}$$

2. Число витков во вторичной обмотке трансформатора

$$w_2 = U_{2\text{ном}} / (4,44 f \Phi_{\text{max}}) = 230 / (4,44 \cdot 50 \cdot 0,06) = 17 \text{ витков.}$$

3. Количество витков в первичной обмотке

$$w_1 = w_2 k = 17 \cdot 15 = 255 \text{ витков.}$$

Задача 1.5. В табл. 1.4 приведены данные некоторых параметров трехфазных масляных трансформаторов: номинальная мощность $S_{\text{ном}}$; номинальные первичное $U_{1\text{ном}}$ и вторичное $U_{2\text{ном}}$ напряжения; номинальный ток первичной стороны $I_{1\text{ном}}$; напряжение короткого замыкания u_k и его активная $u_{k,a}$ и реактивная $u_{k,p}$ составляющие; ток холостого хода i_0 ; мощности холостого хода P_0 и короткого замыкания P_k ; коэффициенты мощности холостого хода $\cos \varphi_0$ и короткого замыкания $\cos \varphi_k$; сопротивление короткого замыкания Z_k и его активная r_k и реактивная x_k составляющие; номинальное изменение напряжения при сбросе нагрузки $\Delta U_{\text{ном}}$ при коэффициенте мощности нагрузки трансформатора $\cos \varphi_2 = 0,8$ (характер нагрузки — индуктивный). Соединение обмоток трансформатора Y/Y. Требуется определить параметры трансформатора, значения которых в таблице не указаны.

Решение варианта с трансформатором ТМ-25/10.

1. Номинальный ток в первичной обмотке

$$I_{1\text{ном}} = S_{\text{ном}} / (\sqrt{3} U_{1\text{ном}}) = 25 / (1,73 \cdot 10) = 1,44 \text{ А.}$$

Таблица 1.4

Параметр	Тип трансформатора					
	ТМ-25/10	ТМ-40/6	ТМ-63/10	ТМ-100/6	ТМ-160/10	ТМ-250/6
$S_{\text{ном}}, \text{кВ} \cdot \text{А}$	25	—	63	—	—	250
$U_{\text{ном}}, \text{кВ}$	10	6	10	6	10	—
$u_k, \%$	4,5	—	4,5	—	4,5	—
$i_0, \%$	3,2	—	4,5	2,6	2,4	—
$P_0, \text{кВт}$	0,13	0,175	—	—	0,51	—
$P_k, \text{кВт}$	0,6	0,88	—	—	2,65	—
$I_{\text{ном}}, \text{А}$	—	3,87	—	9,6	9,2	24
$I_0, \text{А}$	—	0,115	0,16	—	—	—
$U_k, \text{кВ}$	—	0,28	0,45	—	—	—
$Z_k, \text{Ом}$	—	—	—	—	—	—
$\cos \varphi_k$	—	—	—	0,30	—	—
$\sin \varphi_k$	—	—	—	—	—	—
$\cos \varphi_0$	—	—	—	—	—	0,13
$u_{k,a}, \%$	—	—	—	1,95	—	—
$u_{k,p}, \%$	—	—	—	6,2	—	—
$r_k, \text{Ом}$	—	—	—	—	—	0,0036
$x_k, \text{Ом}$	—	—	—	—	—	0,01
$\Delta U_{\text{ном}}, \%$	—	—	—	—	—	—

2. Ток холостого хода

$$I_0 = (i_0/100)I_{\text{ном}} = (3,2/100)1,44 = 0,046 \text{ А.}$$

3. Коэффициент мощности холостого хода

$$\cos \varphi_0 = P_0 / (\sqrt{3}I_0 U_{\text{ном}}) = 0,13 / (1,73 \cdot 0,046 \cdot 10) = 0,16.$$

4. Напряжение короткого замыкания

$$U_k = (u_k/100)U_{\text{ном}} / \sqrt{3} = (4,5/100)10 / 1,73 = 0,26 \text{ кВ.}$$

5. Коэффициент мощности короткого замыкания

$$\cos \varphi_k = P_k / (3 I_{1\text{ном}} U_k) = 0,6 / (3 \cdot 1,44 \cdot 0,26) = 0,53; \quad \sin \varphi_k = 0,85.$$

6. Активная и реактивная составляющие напряжения короткого замыкания

$$u_{k.a} = u_k \cos \varphi_k = 4,5 \cdot 0,53 = 2,38 \%;$$

$$u_{k.p} = u_k \sin \varphi_k = 4,5 \cdot 0,85 = 3,8 \%.$$

7. Сопротивление короткого замыкания

$$Z_k = U_k / I_{1\text{ном}} = 0,26 \cdot 10^3 / 1,44 = 180 \text{ Ом}.$$

8. Активная и индуктивная составляющие сопротивлений короткого замыкания

$$r_k = Z_k \cos \varphi_k = 180 \cdot 0,53 = 95,4 \text{ Ом};$$

$$x_k = Z_k \sin \varphi_k = 180 \cdot 0,85 = 153 \text{ Ом}.$$

9. Номинальное изменение напряжения трансформатора при бросе нагрузки

$$\Delta U_{\text{ном}} = u_{k.a} \cos \varphi_2 + u_{k.p} \sin \varphi_2 = 2,38 \cdot 0,8 + 3,8 \cdot 0,6 = 4,18 \%.$$

Задача 1.6. Технические данные трехфазных трансформаторов серии ТМ приведены в табл. 1.5: номинальная мощность $S_{\text{ном}}$, номинальные первичное $U_{1\text{ном}}$ и вторичное $U_{2\text{ном}}$ напряжения, напряжение короткого замыкания u_k , мощность короткого замыкания $P_{k,\text{ном}}$, мощность холостого хода $P_{0\text{ном}}$, ток холостого хода i_0 . Определить необходимые параметры и построить треугольник короткого замыкания (обмотки соединены Y/Y; параметры приведены к рабочей температуре).

Таблица 1.5

Тип трансформатора	$U_{\text{ном}}$ кВ А	$U_{1\text{ном}}$ кВ	$U_{2\text{ном}}$ кВ	u_k , %	$P_{k,\text{ном}}$ кВт	$P_{0\text{ном}}$ кВт	i_0 , %
ТМ-1000/10	1000	10	0,4	5,5	12,2	2,45	1,4
ТМ-1600/10	1600	10	0,4	5,5	18,0	3,3	1,3
ТМ-2500/10	2500	10	0,4	5,5	25,0	4,6	1,0
ТМ-4000/10	4000	10	0,4	5,5	33,5	6,4	0,9
ТМ-6300/10	6300	10	0,4	5,5	46,0	9,0	0,8
ТМ-630/10	630	10	0,4	5,5	7,6	1,56	2,0

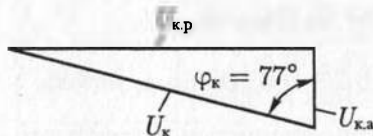


Рис. 1.6. Треугольник напряжений короткого замыкания

Решение варианта с трансформатором ТМ-630/10.

1. Напряжение короткого замыкания

$$U_{1к} = 10^{-2} u_k U_{1ном} = 10^{-2} \cdot 5,5 \cdot 10 \cdot 10^3 = 550 \text{ В.}$$

2. Ток короткого замыкания

$$I_{1к} = I_{1ном} = S_{ном} / (\sqrt{3} U_{1ном}) = 630 \cdot 10^3 / (1,73 \cdot 10 \cdot 10^3) = 36,4 \text{ А.}$$

3. Коэффициент мощности режима короткого замыкания

$$\cos \varphi_k = P_{к.ном} / (\sqrt{3} U_{1к} I_{1к}) = 7600 / (1,73 \cdot 550 \cdot 36,4) = 0,22;$$

$$\varphi_k = 77^{\circ}; \sin \varphi_k = 0,97.$$

4. Полное сопротивление короткого замыкания

$$z_k = U_{1к} / (\sqrt{3} I_{1к}) = 550 / (\sqrt{3} \cdot 36,4) = 8,7 \text{ Ом.}$$

5. Активная составляющая сопротивления короткого замыкания

$$r_k = z_k \cos \varphi_k = 8,7 \cdot 0,22 = 1,9 \text{ Ом.}$$

6. Индуктивная составляющая сопротивления короткого замыкания

$$x_k = z_k \sin \varphi_k = 8,7 \cdot 0,97 = 8,44 \text{ Ом.}$$

7. Стороны треугольника напряжений короткого замыкания (рис. 1.6)

$$U_k = I_{1к} z_k = 36,4 \cdot 8,7 = 317 \text{ В;}$$

$$U_{к.а} = I_{1к} r_k = 36,4 \cdot 1,9 = 69 \text{ В;}$$

$$U_{к.р} = I_{1к} x_k = 36,4 \cdot 8,44 = 307 \text{ В.}$$

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

$$U_k = 317/5 = 63 \text{ мм; } U_{к.а} = 69/5 = 14 \text{ мм; } U_{к.р} = 307/5 = 61 \text{ мм.}$$

Задача 1.7. Используя данные задачи 1.6, рассчитать величину изменения напряжения на выходе трансформатора при номинальной нагрузке $\Delta U_{ном}$ при коэффициентах мощности нагрузки $\cos \varphi_2 = 1$ и $\cos \varphi_2 = 0,8$ и при индуктивном и емкостном характерах нагрузки, а также при активно-индуктивном характере нагрузки и фазовом сдвиге $\varphi_2 = \varphi_k$. Сравнить полученные результаты и сделать вывод о влиянии характера нагрузки на величину вторичного напряжения трансформатора.

Решение варианта с трансформатором ТМ-630/10.

1. Для решения задачи воспользуемся формулой

$$\Delta U_{\text{ном}} = u_{\text{к.а}} \cos \varphi_2 + u_{\text{к.р}} \sin \varphi_2,$$

где

$$u_{\text{к.а}} = (U_{\text{к.а}} / U_{\text{ном}}) 100 = (69 / 10\,000) 100 = 0,69 \%;$$

$$u_{\text{к.р}} = (U_{\text{к.р}} / U_{\text{ном}}) 100 = (307 / 10\,000) 100 = 3,07 \%;$$

$$u_{\text{к}} = (U_{\text{к}} / U_{\text{ном}}) 100 = (317 / 10\,000) 100 = 3,17 \%;$$

$$\cos \varphi_{\text{к}} = u_{\text{к.а}} / u_{\text{к}} = 0,69 / 3,17 = 0,22.$$

2. Нагрузка активная $\cos \varphi_2 = 1$; $\sin \varphi_2 = 0$

$$\Delta U_{\text{ном}} = 0,69 \cdot 1 + 0 = 0,69 \%.$$

3. Нагрузка активно-индуктивная $\cos \varphi_2 = 0,8$; $\sin \varphi_2 = 0,6$

$$\Delta U_{\text{ном}} = 0,69 \cdot 0,8 + 3,07 \cdot 0,6 = 2,4 \%.$$

4. Нагрузка активно-емкостная $\cos \varphi_2 = 0,8$; $\sin \varphi_2 = 0,6$ (при расчете второе слагаемое принять со знаком «минус»)

$$\Delta U_{\text{ном}} = 0,69 \cdot 0,8 - 3,07 \cdot 0,6 = -1,3 \%.$$

5. Нагрузка активно-индуктивная при $\varphi_2 = \varphi_{\text{к}} = 77^\circ$, т.е. при $\cos \varphi_{\text{к}} = 0,22$ и $\sin \varphi_2 = 0,97$

$$\Delta U_{\text{ном}} = 0,69 \cdot 0,22 + 3,07 \cdot 0,97 = 3,13 \%.$$

6. Анализируя полученные результаты, делаем вывод:

а) минимальное изменение напряжения на выходе трансформатора при номинальной нагрузке имеет место при чисто активной нагрузке (0,69 %);

б) наибольшее значение $\Delta U_{\text{ном}} = 3,13 \%$ имеет место при активно-индуктивной нагрузке, когда угол фазового сдвига $\varphi_2 = \varphi_{\text{к}} = 77^\circ$;

в) при активно-емкостном характере нагрузки $\Delta U_{\text{ном}}$ приобретает отрицательное значение, т.е. напряжение на выводах вторичной обмотки при номинальной нагрузке трансформатора повышается на 1,3 %.

Векторная диаграмма, потери и КПД трансформатора

Задача 1.8. Для однофазного трансформатора номинальной мощностью $S_{\text{ном}}$ и номинальным первичным напряжением $U_{1\text{ном}}$, мощностью короткого замыкания $P_{\text{к.ном}}$ и напряжением короткого замыкания $u_{\text{к}}$ рассчитать данные и построить график зависимости изменения вторичного напряжения ΔU от коэффициента нагрузки β , если коэффициент мощности нагрузки $\cos \varphi_2$. Значения перечисленных параметров приведены в табл. 1.6 (параметры приведены к рабочей температуре).

Параметр	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$S_{\text{ном}}$, кВ·А	600	250	800	100	180	560	320	50	120	80
$U_{1 \text{ ном}}$, кВ	31,5	6,3	31,5	6,3	6,3	10	10	3,4	6,3	10
$P_{\text{к.ном}}$, кВт	20	12	22	7	10	25	13	3,5	8	5,4
$u_{\text{к}}$, %	8,5	6,5	8,5	5,5	6,5	7	6,5	5,5	5,5	6
$\cos \varphi_2$	0,75 (емк.)	0,85 (инд.)	0,80 (емк.)	0,70 (инд.)	1,0	0,85 (инд.)	0,9 (емк.)	1,0	0,80 (инд.)	0,70 (инд.)

Решение варианта 1.

1. Напряжение короткого замыкания

$$U_{1\text{к}} = 10^{-2} u_{\text{к}} U_{1\text{ном}} = 10^{-2} \cdot 8,5 \cdot 31,5 \cdot 10^3 = 2677 \text{ В.}$$

2. Ток короткого замыкания

$$I_{1\text{к}} = I_{1\text{ном}} = S_{\text{ном}} / (U_{1\text{ном}}) = 600 \cdot 10^3 / (31,5 \cdot 10^3) = 19 \text{ А.}$$

3. Коэффициент мощности режима короткого замыкания

$$\cos \varphi_{\text{к}} = P_{\text{к.ном}} / (U_{1\text{к}} I_{1\text{к}}) = 20\,000 / (2677 \cdot 19) = 0,39;$$

$$\sin \varphi_{\text{к}} = 0,92.$$

4. Активная составляющая напряжения короткого замыкания

$$u_{\text{к.а}} = u_{\text{к}} \cos \varphi_{\text{к}} = 8,5 \cdot 0,39 = 3,3 \, \%.$$

5. Реактивная составляющая напряжения короткого замыкания

$$u_{\text{к.р}} = u_{\text{к}} \sin \varphi_{\text{к}} = 8,5 \cdot 0,92 = 7,8 \, \%.$$

6. Задаемся рядом значений коэффициента нагрузки:

$$\beta = 0,25; 0,50; 0,75 \text{ и } 1.$$

7. Используя эти значения β , по формуле

$$\Delta U = \beta (u_{\text{к.а}} \cos \varphi_2 - u_{\text{к.р}} \sin \varphi_2),$$

рассчитываем ΔU ; знак «минус» в формуле обусловлен емкостным характером нагрузки (см. табл. 1.6). Результаты расчета приведены ниже:

$$\begin{array}{cccccc} \beta & \underline{\hspace{2cm}} & 0 & 0,25 & 0,50 & 0,75 & 1,0 \\ \Delta U, \% & \underline{\hspace{2cm}} & 0 & -0,67 & -1,34 & -2,01 & -2,68 \end{array}$$

Знак «минус» в полученном результате указывает на то, что с ростом нагрузки трансформатора напряжение на зажимах вторич-

ной обмотки *увеличивается*, что связано с емкостным характером нагрузки трансформатора.

Задача 1.9. Используя параметры однофазных трансформаторов, приведенные в табл. 1.6, и результаты решения задачи 1.8, рассчитать необходимые параметры и построить упрощенную векторную диаграмму трансформатора (током холостого хода пренебречь). При этом рассмотреть два случая номинальной нагрузки трансформатора при значении коэффициента мощности $\cos \varphi_1 = 0,7$: при индуктивном характере нагрузки и при емкостном характере нагрузки. Определить коэффициент мощности трансформатора $\cos \varphi_2$.

Решение варианта 1.

Запишем значения параметров, необходимых для построения векторной диаграммы.

Номинальное первичное напряжение

$$U_{1\text{ном}} = 31,5 \text{ кВ} = 31\,500 \text{ В.}$$

Активное напряжения короткого замыкания

$$U_{\text{к.а}} = 10^{-2} U_{1\text{ном}} u_{\text{к.а}} = 10^{-2} \cdot 31\,500 \cdot 3,3 = 1040 \text{ В.}$$

Реактивное напряжения короткого замыкания

$$U_{\text{к.р}} = 10^{-2} U_{1\text{ном}} u_{\text{к.р}} = 10^{-2} \cdot 31\,500 \cdot 7,8 = 2457 \text{ В.}$$

Номинальный ток в первичной цепи

$$I_{1\text{ном}} = S_{\text{ном}} / U_{1\text{ном}} = 600 \cdot 10^3 / 31\,500 = 19 \text{ А.}$$

Угол фазового сдвига $\varphi_1 = \arccos 0,7 = 45^\circ$.

Порядок построения диаграммы (рис. 1.7). Необходимо выбрать масштаб напряжения. При этом следует определить размер листа бумаги, на котором будет построена диаграмма. Например, для

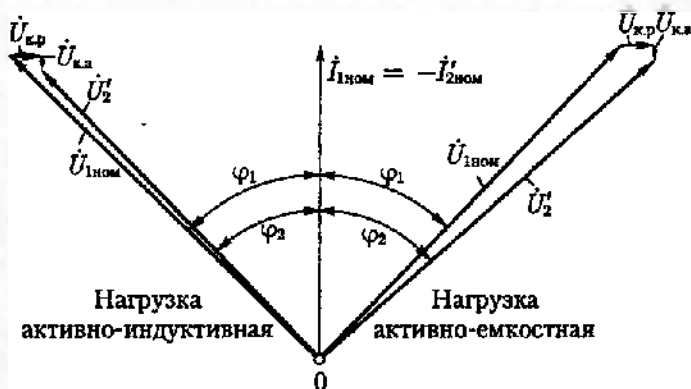


Рис. 1.7. Упрощенная векторная диаграмма трансформатора

листа форматом А4 целесообразно принять масштаб $m_U = 150 \text{ В/мм}$. В этом случае длина векторов составит:

первичного напряжения $U_{1\text{ном}}$ 210 мм;
 активного напряжения короткого замыкания $U_{к.а}$ 7,0 мм;
 реактивного напряжения короткого замыкания $U_{к.р}$ 16,5 мм.

На оси ординат строим вектор тока $\dot{I}_{1\text{ном}} = -\dot{I}'_2$. Этот вектор проводим произвольной длины, так как она не оказывает влияние на диаграмму. Затем в сторону опережения по фазе (влево от вектора тока) под углом $\varphi_1 = 45^\circ$ строим вектор напряжения $\dot{U}_{1\text{ном}}$. Из конца этого вектора перпендикулярно вектору тока проводим вектор реактивного напряжения короткого замыкания $\dot{U}_{к.р}$, а затем из конца этого вектора параллельно — встречно вектору тока $\dot{I}_{1\text{ном}}$ строим вектор активного напряжения короткого замыкания $\dot{U}_{к.а}$. Соединив начало диаграммы (точка 0) с концом вектора $\dot{U}_{к.а}$, получают вектор приведенного значения вторичного напряжения $\dot{U}'_2$. Измерив угол $\varphi_2 = 43^\circ$, определяют коэффициент мощности $\cos \varphi_2 = 0,731$.

Диаграмму для случая активно-емкостной нагрузки строят аналогично, но вектор напряжения $\dot{U}_{1\text{ном}}$ откладывают вправо от вектора тока. Выполнив необходимые построения, видим, что вектор напряжения $\dot{U}'_2$ увеличился, т. е. напряжение на выходе вторичной обмотки при активно-индуктивной нагрузке возрастает. Угол $\varphi_2 = 48^\circ$, а $\cos \varphi_2 = 0,67$.

Задача 1.10. Трехфазный трансформатор имеет параметры, значения которых приведены в табл. 1.7: номинальная мощность $S_{\text{ном}}$ и номинальные напряжения (линейные) $U_{1\text{ном}}$ и $U_{2\text{ном}}$, напряжение короткого замыкания u_k , ток холостого хода i_0 , потери холостого хода $P_{0\text{ном}}$ и потери короткого замыкания $P_{к.ном}$. Обмотки трансформатора соединены по схеме «звезда — звезда». Требуется определить:

Таблица 1.7

Параметр	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$S_{\text{ном}}$, кВ · А	100	180	320	560	1000	800	600	700	400	200
$U_{1\text{ном}}$, кВ	0,5	3,0	6,0	10	35	10	10	6,0	3,0	3,0
$U_{2\text{ном}}$, кВ	0,23	0,4	0,4	0,4	3,0	0,4	0,6	0,6	0,23	0,23
u_k , %	5,5	5,5	8,5	6,5	5,5	6,5	8,5	5,5	6,5	5,5
i_0 , %	6,5	5,5	5,5	5,5	5,0	5,0	5,5	5,5	5,5	6,5
$P_{0\text{ном}}$, кВт	0,65	1,2	1,6	2,5	5,2	3,6	2,8	3,2	2,0	1,5
$P_{к.ном}$, кВт	2,0	3,6	5,8	9,0	13,5	10,0	9,0	8,2	6,0	4,0

параметры Т-образной схемы замещения, считая ее симметричной ($r_1 = r_2$ и $x_1 = x_2'$), а также фактические значения сопротивлений вторичной обмотки; величины КПД η , соответствующие значениям полной мощности трансформатора $0,25 S_{\text{ном}}$; $0,5 S_{\text{ном}}$; $0,75 S_{\text{ном}}$ и $S_{\text{ном}}$ при коэффициентах мощности нагрузки $\cos \varphi_2 = 0,8$ (индуктивный характер нагрузки) и $\cos \varphi_2 = 1$; номинальное изменение напряжения $\Delta U_{\text{ном}}$. Построить графики $\eta = f(\beta)$ и $U_2 = f(\beta)$.

Решение варианта 1.

1. Напряжение короткого замыкания

$$U_{1\text{к}} = 10^{-2} u_{\text{к}} U_{1\text{ном}} = 10^{-2} \cdot 5,5 \cdot 500 = 27,5 \text{ В.}$$

2. Ток короткого замыкания

$$I_{1\text{к}} = I_{1\text{ном}} = S_{\text{ном}} / (\sqrt{3} U_{1\text{ном}}) = 100 \cdot 10^3 / (1,73 \cdot 0,5 \cdot 10^3) = 115,6 \text{ А.}$$

3. Коэффициент мощности в режиме короткого замыкания

$$\cos \varphi_{\text{к}} = P_{\text{к}} / (\sqrt{3} U_{1\text{к}} I_{1\text{к}}) = 2000 / (1,73 \cdot 27,5 \cdot 115,6) = 0,36;$$

$$\varphi_{\text{к}} = 69^\circ; \sin \varphi_{\text{к}} = 0,93.$$

4. Полное сопротивление короткого замыкания

$$z_{\text{к}} = U_{1\text{к}} / (\sqrt{3} I_{1\text{к}}) = 27,5 / (\sqrt{3} \cdot 115,6) = 0,137 \text{ Ом.}$$

5. Активная составляющая сопротивления короткого замыкания

$$r_{\text{к}} = z_{\text{к}} \cos \varphi_{\text{к}} = 0,137 \cdot 0,36 = 0,05 \text{ Ом.}$$

6. Индуктивная составляющая сопротивления короткого замыкания

$$x_{\text{к}} = z_{\text{к}} \sin \varphi_{\text{к}} = 0,137 \cdot 0,93 = 0,13 \text{ Ом.}$$

7. Активные и индуктивные сопротивления Т-образной схемы замещения трансформатора (см. рис. 1.2)

$$r_1 = r_2' = 0,05/2 = 0,025 \text{ Ом;}$$

$$x_1 = x_2' = 0,13/2 = 0,065 \text{ Ом.}$$

8. Фактические (неприведенные) значения сопротивлений вторичной обмотки трансформатора

$$r_2 = r_2' / (U_1 / U_2)^2 = 0,0225 / (500/230)^2 = 0,005 \text{ Ом;}$$

$$x_2 = x_2' / (U_1 / U_2)^2 = 0,065 / (500/230)^2 = 0,014 \text{ Ом.}$$

9. Ток холостого хода

$$I_{0\text{ном}} = 10^{-2} i_0 I_{1\text{ном}} = 10^{-2} \cdot 6,5 \cdot 115,6 = 7,5 \text{ А.}$$

10. Коэффициент мощности в режиме холостого хода

$$\cos \varphi_0 = P_{\text{ном}} / (\sqrt{3} I_{\text{ном}} U_{\text{ном}}) = 650 / (1,73 \cdot 7,5 \cdot 500) = 0,10;$$

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

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

$$z_m = U_{\text{ном}} / (\sqrt{3} I_{\text{ном}}) = 500 / (1,73 \cdot 7,5) = 38,5 \text{ Ом}.$$

12. Активное и индуктивное составляющие ветви намагничивания

$$r_m = z_m \cos \varphi_0 = 38,5 \cdot 0,10 = 3,85 \text{ Ом};$$

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

13. Для расчета КПД воспользуемся выражением

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

Задав значениями коэффициента нагрузки: $\beta = 0,25; 0,50; 0,75$ и $1,0$, рассчитываем для каждого из них КПД сначала для коэффициента мощности нагрузки $\cos \varphi_2 = 1$, а затем для $\cos \varphi_2 = 0,8$.

14. Коэффициент нагрузки, соответствующий максимальному КПД,

$$\beta' = \sqrt{P_{\text{ном}} / P_{\text{к.ном}}} = \sqrt{0,65 / 2,0} = 0,57.$$

15. Максимальные значения КПД:

при $\cos \varphi_2 = 1$

$$\eta_{\text{max}} = \frac{\beta' S_{\text{ном}} \cos \varphi_2}{3' S_{\text{ном}} \cos \varphi_2 + 2 P_{\text{ном}}} = \frac{0,57 \cdot 100 \cdot 1}{0,57 \cdot 100 \cdot 1 + 2 \cdot 0,65} = 0,978;$$

при $\cos \varphi_2 = 0,8$

$$\eta_{\text{max}} = \frac{0,57 \cdot 100 \cdot 0,8}{0,57 \cdot 100 \cdot 0,8 + 2 \cdot 0,65} = 0,972.$$

Результаты расчетов приведены ниже:

β	0,25	0,50	0,75	1,0
η (при $\cos \varphi_2 = 1$)	0,969	0,977	0,978	0,974
η (при $\cos \varphi_2 = 0,8$ инд.)	0,962	0,972	0,971	0,967

На рис. 1.8, а представлены графики $\eta = f(\beta)$.

Из анализа полученных результатов следует: КПД трансформатора при чисто активной нагрузке выше, чем при активно-индуктивной нагрузке во всем диапазоне значений β .

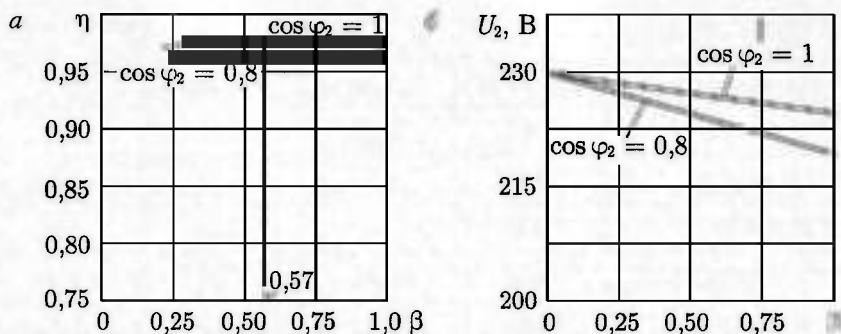


Рис. 1.8. Зависимости $\eta = f(\beta)$ и $U_2 = f(\beta)$ трансформатора

16. Для расчета номинального изменения напряжения воспользуемся выражением

где

$$u_{k.a} = u_k \cos \varphi_k = 5,5 \cdot 0,36 = 1,98 \%;$$

$$u_{k.p} = u_k \sin \varphi_k = 5,5 \cdot 0,93 = 5,1 \%.$$

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

$$\Delta U_{\text{ном}} = 1,98 \cdot 0,8 + 5,1 \cdot 0,6 = 4,64 \%.$$

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

$$\Delta U_{\text{ном}} = 1,98 \cdot 1 + 5,1 \cdot 0 = 1,98 \%.$$

На рис. 1.8, б показаны внешние характеристики трансформатора.

Задача 1.11. В табл. 1.8 приведены данные трехфазных силовых трансформаторов серии ТМ: полная номинальная мощность $S_{\text{ном}}$; номинальные потери холостого хода $P_{0\text{ном}}$ и короткого замыкания $P_{k\text{ном}}$; коэффициент мощности нагрузки $\cos \varphi_2$. Требуется определить величину снижения КПД при номинальной нагрузке по сравнению с его максимальным значением.

Решение варианта с трансформатором ТМ-100/35.

1. КПД в номинальном режиме ($\beta = 1$)

$$\eta_{\text{ном}} = P_{\text{ном}} / P_{1\text{ном}}$$

$$P_{1\text{ном}} = S_{\text{ном}} \cos \varphi_2 = 100 \cdot 0,8 = 80 \text{ кВт};$$

$$P_{\text{ном}} = P_{1\text{ном}} - (P_{0\text{ном}} + P_{k\text{ном}}) = 80 - (0,465 + 1,97) = 77,6 \text{ кВт};$$

$$\eta_{\text{ном}} = 77,6 / 80 = 0,97.$$

2. Расчет максимального КПД ведем по формуле

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

Таблица 1.8

Тип трансформатора	$S_{\text{ном}}, \text{кВ} \cdot \text{А}$	$P_{\text{ном}}, \text{кВт}$	$P_{\text{х.ном}}, \text{кВт}$	$\cos \varphi_2$
ТМ-100/35	100	0,465	1,97	0,80
ТМ-160/35	160	0,70	2,65	0,85
ТМ-250/35	250	1,0	3,70	0,85
ТМ-400/35	400	1,35	5,50	0,80
ТМ-630/35	630	1,90	7,60	0,75
ТМ-1000/35	1000	2,75	12,2	0,70
ТМ-1600/35	1600	3,65	18,0	0,80
ТМ-2500/35	2500	5,10	25,0	0,75
ТМ-4000/35	4000	6,70	33,5	0,85
ТМ-6300/35	6300	9,40	46,5	0,80

3. Коэффициент нагрузки, соответствующий максимальному КПД,

$$\beta' = \sqrt{P_{\text{ном}}/P_{\text{х.ном}}} = \sqrt{0,465/1,97} = 0,485.$$

4. Подставив в формулу расчета максимального КПД значение коэффициента нагрузки $\beta' = 0,485$, получим

$$\eta_{\text{max}} = \frac{0,485 \cdot 100 \cdot 0,8}{0,485 \cdot 100 \cdot 0,8 + 2 \cdot 0,465} = 0,98.$$

5. Снижение КПД трансформатора при номинальной нагрузке относительно его максимального значения составило

$$0,98 - 0,97 = 0,01, \text{ т. е. } 1\%.$$

Задача 1.12. В табл. 1.9 приведены технические данные трехфазных трансформаторов серии ТСЗ (трансформатор трехфазный сухой с заземленной первичной обмоткой). Используя эти данные, определить: коэффициент трансформации k , номинальные значения токов первичной $I_{1\text{ном}}$ и вторичной $I_{2\text{ном}}$ обмоток; ток холостого хода $I_{\text{ном}}$; напряжение короткого замыкания $U_{\text{х.ном}}$; сопротивление короткого замыкания $Z_{\text{к}}$ и его активную $r_{\text{к}}$ и индуктивную $x_{\text{к}}$ составляющие; определить номинальное изменение напряжения при значениях коэффициента мощности нагрузки $\cos \varphi_2 = 1$; 0,8 (инд.) и 0,8 (емк.); номинальные и максимальные значения КПД трансформатора при коэффициентах мощности нагрузки $\cos \varphi_2 = 1$ и 0,8.

Тип транс- форматора	$S_{\text{ном}}, \text{кВ} \cdot \text{А}$	$U_{2\text{ном}}, \text{В}$	$P_0, \text{кВт}$	$P_{\text{к. ном}}, \text{кВт}$	$\eta, \%$	$\omega, \%$	
ТСЗ-160/6	160	6	0,23	0,7	2,7	5,5	4,0
ТСЗ-160/10	160	10	0,4	0,7	2,7	5,5	4,0
ТСЗ-250/6	250	6	0,23	1,0	3,8	5,5	3,5
ТСЗ-250/10	250	10	0,4	1,0	3,8	5,5	3,5
ТСЗ-400/6	400	6	0,23	1,3	5,4	5,5	3,0
ТСЗ-400/10	400	10	0,4	1,3	5,4	5,5	3,0
ТСЗ-630/6	630	6	0,4	2,0	7,3	5,5	1,5
ТСЗ-630/10	630	10	0,4	2,0	7,3	5,5	1,5
ТСЗ-1000/6	1000	6	0,4	3,0	11,3	5,5	1,5
ТСЗ-1000/10	1000	10	0,4	3,0	11,3	5,5	1,5
ТСЗ-1600/10	1600	10	0,4	4,2	16,0	5,5	1,5

Решение варианта с трансформатором ТСЗ-160/6.

1. Коэффициент трансформации

$$k = U_{1\text{ном}} / U_{2\text{ном}} = 6 / 0,23 = 26.$$

2. Номинальный ток первичной обмотки

$$I_{1\text{ном}} = S_{\text{ном}} / (\sqrt{3} U_{1\text{ном}}) = 160 / (1,73 \cdot 6) = 15,4 \text{ А.}$$

3. Номинальный ток вторичной обмотки

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

4. Ток холостого хода

$$I_0 = (\omega_0 / 100) I_{1\text{ном}} = (4 / 100) 15,4 = 0,6 \text{ А.}$$

5. Напряжение короткого замыкания

$$U_{1\text{к}} = (u_{\text{к}} / 100) U_{1\text{ном}} = (5,5 / 100) 6000 = 330 \text{ В.}$$

6. Сопротивление короткого замыкания

$$Z_{\text{к}} = U_{1\text{к}} / (\sqrt{3} I_{1\text{к}}) = 330 / (1,73 \cdot 15,4) = 12,4 \text{ Ом.}$$

7. Коэффициент мощности короткого замыкания

$$\cos \varphi_{\text{к}} = P_{\text{к}} / (\sqrt{3} U_{\text{к}} I_{1\text{ном}}) = 2700 / (1,73 \cdot 330 \cdot 15,4) = 0,31; \sin \varphi_{\text{к}} = 0,95.$$

8. Активная и реактивная составляющие сопротивления короткого замыкания

$$r_k = Z_k \cos \varphi_k = 12,4 \cdot 0,31 = 3,8 \text{ Ом};$$

$$x_k = Z_k \sin \varphi_k = 12,4 \cdot 0,95 = 11,8 \text{ Ом}.$$

9. Активная и реактивная составляющие напряжения короткого замыкания

$$u_{k.a} = u_k \cos \varphi_k = 5,5 \cdot 0,31 = 1,7 \%;$$

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

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

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

$$\Delta U_{\text{ном}} = u_{k.a} \cos \varphi_2 + u_{k.p} \sin \varphi_2 = 1,7 \cdot 1 + 0 = 1,7 \%;$$

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

$$\Delta U_{\text{ном}} = u_{k.a} \cos \varphi_2 + u_{k.p} \sin \varphi_2 = 1,7 \cdot 0,8 + 5,2 \cdot 0,6 = 4,48 \%;$$

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

$$\Delta U_{\text{ном}} = u_{k.a} \cos \varphi_2 + u_{k.p} \sin \varphi_2 = 1,7 \cdot 0,8 + 5,2 \cdot (-0,6) = -1,8 \%.$$

Результаты расчета изменения вторичного напряжения трансформатора $\Delta U_{\text{ном}}$ при номинальной нагрузке ($\beta = 1$):

$\cos \varphi_2$	1,0	0,8 (инд.)	0,8 (емк.)
$\Delta U_{\text{ном}}, \%$	1,7	4,48	-1,8
$\Delta U_{\text{ном}}, \text{В}$	3,9	10,3	-4,14
$U_2 = U_{2\text{ном}} - \Delta U_{\text{ном}}, \text{В}$	226	220	234

Внешние характеристики трансформатора представлены на рис. 1.9.

11. КПД трансформатора при номинальной нагрузке ($\beta = 1$) и коэффициенте мощности $\cos \varphi_2 = 1$

$$\eta = \frac{\beta S_{\text{ном}} \cos \varphi_2}{\beta S_{\text{ном}} \cos \varphi_2 + P_{0\text{ном}} + \beta^2 P_{\text{кном}}} = \frac{1 \cdot 160 \cdot 1}{1 \cdot 160 \cdot 1 + 0,7 + 1^2 \cdot 2,7} = 0,98;$$

при номинальной нагрузке и коэффициенте мощности $\cos \varphi_2 = 0,8$

$$\eta = \frac{1 \cdot 160 \cdot 0,8}{1 \cdot 160 \cdot 0,8 + 0,7 + 1^2 \cdot 2,7} = 0,974.$$

12. Максимальный КПД:

при $\cos \varphi_2 = 1$

$$\eta_{\text{max}} = \frac{\beta' S_{\text{ном}} \cos \varphi_2}{\beta' S_{\text{ном}} \cos \varphi_2 + 2P_{0\text{ном}}} = \frac{0,51 \cdot 160 \cdot 1}{0,51 \cdot 160 \cdot 1 + 2 \cdot 0,7} = 0,983;$$

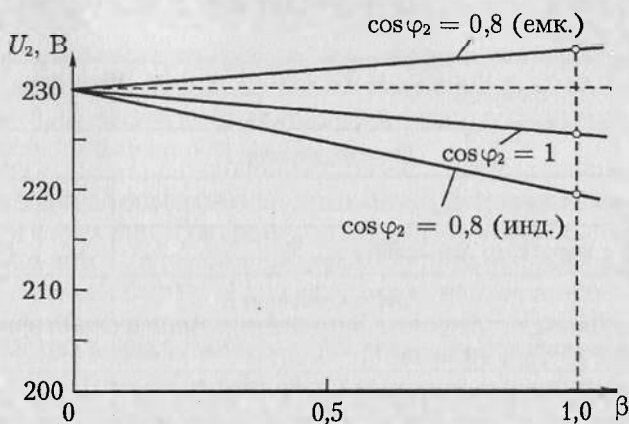


Рис. 1.9. Внешние характеристики трансформатора

при $\cos \varphi_2 = 0,8$

$$\beta_{\text{max}} = \frac{0,51 \cdot 160 \cdot 0,8}{0,51 \cdot 160 \cdot 0,8 + 2 \cdot 0,7} = 0,979,$$

где коэффициент нагрузки, соответствующий максимальному КПД,

$$\beta' = \sqrt{P_{\text{ном}} / P_{\text{к.ном}}} = \sqrt{0,7 / 2,7} = 0,51.$$

Параллельная работа трансформаторов. Автотрансформаторы

Задача 1.13. Три трехфазных трансформатора номинальной мощностью $S_{\text{номI}}$, $S_{\text{номII}}$ и $S_{\text{номIII}}$ и напряжением короткого замыкания $u_{\text{кI}}$, $u_{\text{кII}}$ и $u_{\text{кIII}}$ включены на параллельную работу (табл. 1.10). Требуется определить:

1) нагрузку каждого трансформатора (S_{I} , S_{II} и S_{III}) в $\text{кВ} \cdot \text{А}$, если общая нагрузка параллельной группы равна сумме номинальных мощностей этих трансформаторов ($S_{\text{общ}} = S_{\text{номI}} + S_{\text{номII}} + S_{\text{номIII}}$);

2) степень использования каждого из трансформаторов по мощности ($S/S_{\text{ном}}$);

3) насколько следует уменьшить общую нагрузку трансформаторной группы $S_{\text{общ}}$, чтобы устранить перегрузку трансформаторов; как при этом будут использованы трансформаторы по мощности в % от их номинальной мощности?

Решение варианта 1. В связи с тем, что для параллельного включения применены трансформаторы разной номинальной мощности, напряжения короткого замыкания этих трансформаторов

Таблица 1.10

Параметр	Варианты				
	1	2	3	4	5
<i>Трансформатор I</i>					
Номинальная мощность $S_{\text{номI}}$, кВ · А	5000	5600	3200	1800	560
Напряжение короткого замыкания $u_{\text{кI}}$, %	5,3	5,3	4,3	4,4	4,0
<i>Трансформатор II</i>					
Номинальная мощность $S_{\text{номII}}$, кВ · А	3200	3200	4200	3200	420
Напряжение короткого замыкания $u_{\text{кII}}$, %	5,5	5,5	4,3	4,0	4,2
<i>Трансформатор III</i>					
Номинальная мощность $S_{\text{номIII}}$, кВ · А	1800	3200	5600	4200	200
Напряжение короткого замыкания $u_{\text{кIII}}$, %	5,7	5,5	4,0	3,8	4,5

неодинаковы. Поэтому расчет распределения нагрузки между трансформаторами выполним по формуле

$$S_x = \frac{SS_{\text{хном}}}{u_{\text{кx}} \sum (S_{\text{хном}}/u_{\text{кx}})},$$

учитывающей неодинаковость напряжений короткого замыкания.

1. Общая нагрузка параллельной группы

$$S = S_{\text{номI}} + S_{\text{номII}} + S_{\text{номIII}} = 5000 + 3200 + 1800 = 10\,000 \text{ кВ} \cdot \text{А}.$$

2. Воспользуемся выражением

$$\sum (S_{\text{хном}}/u_{\text{кx}}) = 5000/5,3 + 3200/5,5 + 1800/5,7 = 1841.$$

3. Фактическая нагрузка каждого трансформатора

$$S_{\text{I}} = \frac{10\,000 \cdot 5000}{5,3 \cdot 1841} = 5124 \text{ кВ} \cdot \text{А}; \quad S_{\text{II}} = \frac{10\,000 \cdot 3200}{5,5 \cdot 1841} = 3160 \text{ кВ} \cdot \text{А};$$

$$S_{\text{III}} = \frac{10\,000 \cdot 1800}{5,7 \cdot 1841} = 1715 \text{ кВ} \cdot \text{А}.$$

Анализируя полученный результат, можно сделать вывод:

Больше нагружается трансформатор с меньшим значением напряжения короткого замыкания (трансформатор I) и меньше — трансформаторы с большим значением напряжения короткого замыкания (трансформатор III). Перегруженным оказался трансформатор I: перегрузка составила

$$[(5100 - 5000)/5000]100 = 2\%.$$

Так как перегрузка трансформаторов недопустима, то следует общую нагрузку уменьшить на 2 % и принять ее равной $S' = 10\,000 \cdot 0,98 = 9800 \text{ кВ} \cdot \text{А}$, при этом суммарная мощность трансформаторов окажется недоиспользованной на 2 %.

Задача 1.14. Однофазный понижающий автотрансформатор номинальной (проходной) мощностью $S_{\text{ном}}$ при номинальном первичном напряжении U_1 и номинальном вторичном напряжении U_2 имеет число витков в обмотке w_1 , из которых w_2 витков являются общими для первичной и вторичной цепей (см. рис. 1.4); ЭДС, индуцируемая в одном витке обмотки трансформатора $E_{\text{втек}}$. Требуется определить недостающие в табл. 1.11 значения параметров, а также определить, во сколько раз масса и потери этого автотрансформатора меньше, чем у двухобмоточного трансформатора такой же мощности и напряжений; определить мощности автотрансформатора, передаваемые из первичной во вторичную цепь электрическим и электромагнитным путями. При решении задачи током холостого хода пренебречь.

Р е ш е н и е варианта 1.

1. Число витков в обмотке автотрансформатора

$$w_1 = U_1/E_{\text{втек}} = 220/0,85 = 259 \text{ витков.}$$

2. Вторичное напряжение

$$U_2 = w_2 E_{\text{втек}} = 130 \cdot 0,85 = 110 \text{ В.}$$

3. Коэффициент трансформации автотрансформатора

$$k_A = w_1/w_2 = 259/130 = 2,0.$$

4. Номинальный ток в первичной цепи

$$I_{1\text{ном}} = S_{\text{ном}}/U_{1\text{ном}} = 15 \cdot 10^3/220 = 68 \text{ А.}$$

Т а б л и ц а 1.11

Параметр	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$S_{\text{ном}}, \text{кВ} \cdot \text{А}$	15	4,0	6,0	16	8,0	3,0	5,0	2,8	9,0	12
$U_1, \text{В}$	220	—	380	—	220	—	220	—	380	—
$U_2, \text{В}$	—	110	—	220	—	127	—	140	—	220
$E_{\text{втек}}, \text{В}$	0,85	0,75	1,73	0,90	0,90	0,85	1,0	0,85	1,0	1,022
w_1	—	—	—	—	—	250	250	270	400	400
w_2	130	130	250	240	130	—	—	—	—	—

5. Номинальный ток во вторичной цепи

$$I_{2\text{ном}} = S_{\text{ном}}/U_{2\text{ном}} = 15 \cdot 10^3/110 = 136 \text{ А.}$$

6. Ток в общей части витков обмотки

$$I_{12} = I_2 - I_1 = 136 - 68 = 68 \text{ А.}$$

7. Мощность, передаваемая из первичной во вторичную цепь электрическим путем (см. рис. 1.7),

$$S_3 = S_{\text{ном}}/k_A = 15/2,0 = 7,5 \text{ кВ} \cdot \text{А.}$$

Таким образом, электромагнитным путем передается лишь половина проходной мощности, а поэтому, по сравнению с двухобмоточным трансформатором номинальной мощностью 15 кВ · А, рассматриваемый автотрансформатор изготовлен из активных материалов, масса которых в два раза меньше, а следовательно, и потери в нем также меньше в два раза.

Задача 1.15. В табл. 1.12 указаны значения следующих параметров понижающего автотрансформатора: номинальная (проходная) мощность $S_{\text{ном}}$, коэффициент трансформации k_A , токи в первичной $I_{1\text{ном}}$ и вторичной $I_{2\text{ном}}$ цепях, ток в общей части витков I_{12} , напряжения первичное U_1 и вторичное U_2 , мощности расчетная $S_{\text{расч}}$ и передаваемая электрическим путем S_3 . Используя указанные в таблице значения параметров, определить недостающие значения параметров.

Решение варианта 1.

1. Первичное напряжение

$$U_1 = S_{\text{ном}}/I_{1\text{ном}} = 2640/12 = 220 \text{ В.}$$

Таблица 1.12

Параметр	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$S_{\text{ном}}$, кВ · А	2,64	—	—	2,2	—	3,5	—	3,5	—	2,8
S_3 , кВ · А	—	—	1,3	0,85	—	—	0,65	—	—	—
$S_{\text{расч}}$, кВ · А	—	—	0,5	—	0,8	—	—	—	1,1	—
U_1 , В	—	220	380	—	—	380	—	380	—	—
U_2 , В	127	—	—	250	—	—	300	—	220	—
$I_{1\text{ном}}$, А	12	8	—	—	—	—	—	—	—	12,7
$I_{2\text{ном}}$, А	—	—	—	—	—	12	—	11	15	—
$I_{12\text{ном}}$, А	—	—	—	—	6	—	—	—	—	—
k_A	—	1,35	—	—	1,25	—	1,30	—	—	1,80

2. Коэффициент трансформации

$$k_A = U_1 / U_2 = 220 / 127 = 1,73.$$

3. Вторичный ток

$$I_{2 \text{ ном}} = I_{1 \text{ ном}} k_A = 12 \cdot 1,73 = 21 \text{ A}.$$

4. Ток в общей части витков обмотки автотрансформатора

$$I_{12} = I_2 - I_1 = 21 - 12 = 9 \text{ A}.$$

5. Расчетная мощность автотрансформатора

$$S_{\text{расч}} = U_2 I_{12} = 127 \cdot 9 = 1140 \text{ В} \cdot \text{А}.$$

6. Мощность автотрансформатора, передаваемая во вторичную цепь электрическим путем

$$S_3 = S_{\text{ном}} - S_{\text{расч}} = 2640 - 1140 = 1500 \text{ В} \cdot \text{А}.$$

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ТЕОРИИ БЕСКОЛЛЕКТОРНЫХ МАШИН

2.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

Обмотка статора бесколлекторной машины переменного тока (рис. 2.1) располагается в пазах на внутренней поверхности сердечника статора. Она выполняется из медного изолированного провода круглого или прямоугольного сечения.

Элементом обмотки статора является одно- или многовитковая катушка. Элементы катушки, располагаемые в пазах, называют пазовыми сторонами, а части, находящиеся вне пазов и служащие для соединения пазовых сторон, — лобовыми частями.

Обмотки статора характеризуются параметрами:

числом фазных обмоток: m_1 — однофазные ($m_1 = 1$) и многофазные, обычно трехфазные ($m_1 = 3$);

шагом обмотки по пазам y_1 — с полным (диаметральным) шагом ($y_1 = \tau$) и укороченным шагом ($y_1 < \tau$).

Здесь τ — полюсное деление, м,

$$\tau = \pi D_1 / (2p),$$

где D_1 — внутренний диаметр статора, м; $2p$ — число полюсов в обмотке статора.

Если шаг обмотки полный

$$y_1 = Z_1 / (2p) = \tau,$$

то ЭДС, индуцируемая в каждой витке катушки статора вращающимся магнитным полем, определяется арифметической суммой ЭДС сторон этого витка, т. е.

$$e_{\text{втка}} = e_1 + e_2.$$

Если же шаг обмотки укороченный ($y_1 < \tau$), то ЭДС витка определяется геометрической суммой ЭДС его пазовых сторон, т. е. учитывается фазовый сдвиг этих ЭДС, при этом ЭДС витка, а следовательно

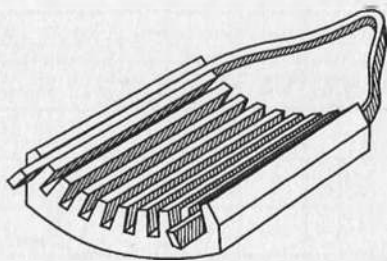


Рис. 2.1. Расположение пазовых сторон катушки в пазах сердечника статора

но, и ЭДС всей фазной обмотки E_y уменьшаются. Это уменьшение ЭДС, вызванное укорочением шага обмотки, учитывается коэффициентом укорочения $k_y = E_y/E_d$. Коэффициент укорочения для ЭДС первой (основной) гармоники

$$k_{y1} = \sin(\beta \cdot 90^\circ).$$

Для ЭДС любой гармоники (ν — номер гармоники)

$$k_{y\nu} = \sin(\nu\beta \cdot 90^\circ).$$

Ниже приведены значения коэффициентов укорочения $k_{y\nu}$ в зависимости от относительного шага обмотки $\beta = y_1/\tau$ для различных гармоник ЭДС:

Относительный шаг β	4/5	6/7	1
Коэффициент укорочения $k_{y\nu}$:			
1-я гармоника	0,951	0,975	1,000
5-я »	0,000	0,433	1,000
7-я »	0,573	0,000	-1,000

По своей конструкции обмотки статора разделяются на сосредоточенные и распределенные. В сосредоточенных обмотках статора обмотка каждой фазы располагается в двух пазах, а в распределенной обмотке статора катушки каждой фазы занимают несколько пазов. Распределение катушек в пазах сердечника статора вызывает некоторое уменьшение ЭДС катушечной группы распределенной обмотки $E_{г.p}$ по сравнению с ЭДС катушечной группы сосредоточенной обмотки $E_{г.c}$ (рис. 2.2, а, б).

Для количественной оценки этого уменьшения ЭДС пользуются *коэффициентом распределения обмотки*, представляющим собой отношение ЭДС распределенной обмотки к ЭДС сосредоточенной обмотки:

$$k_p = (E_{г.p}/E_{г.c}) < 1.$$

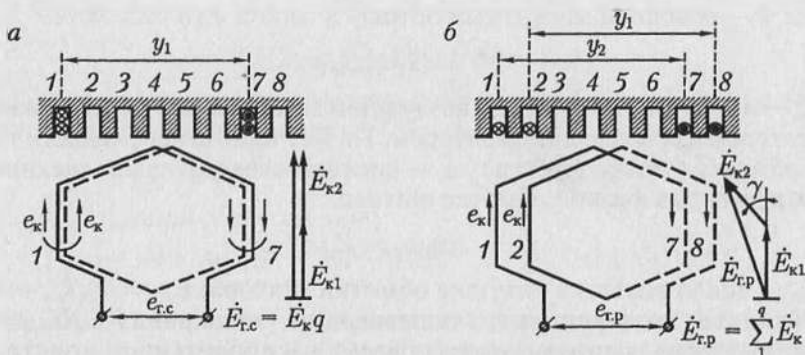


Рис. 2.2. К понятию о коэффициенте распределения

Коэффициент распределения обмотки для первой гармоники ЭДС

$$k_{p1} = \frac{\sin(0,5q_1\gamma)}{q_1 \sin(0,5\gamma)},$$

где γ — угол сдвига по фазе между векторами пазовых ЭДС, т. е. ЭДС, наводимых в проводниках, лежащих в соседних пазах статора, эл. град:

$$\gamma = 360 p_1 / Z_1$$

Так как угол сдвига по фазе между векторами пазовых ЭДС для ν -й гармоники в ν раз больше пазового угла γ , то коэффициент распределения обмотки для любой гармоники ЭДС равен

$$k_{p\nu} = \frac{\sin(0,5\nu q_1\gamma)}{q_1 \sin(0,5\nu\gamma)}$$

Ниже приведены значения коэффициента распределения для первой, пятой и седьмой гармоник ЭДС в зависимости от числа пазов на полюс и фазу

$$q_1 = Z_1 / (2pm_1).$$

Число пазов

на полюс и фазу q_1 — 1 2 3 4 5 6 ∞

Коэффициент

распределения k_p :

1-я гармоника		1,000	0,966	0,960	0,958	0,957	0,956	0,955
3-я	»		1,000	0,707	0,667	0,654	0,646	0,644
5-я	»		1,000	0,259	0,217	0,204	0,200	0,197
7-я	»		-1,000	-0,259	-0,178	-0,157	-0,149	-0,145
							-0,136	

ЭДС фазной обмотки статора определяется выражением:

$$E_{\Phi 1} = 4,44 \Phi f_1 w_1 k_{o61},$$

где Φ — основной магнитный поток,

$$\Phi = (2/\pi) B_\delta l_\tau;$$

B_δ — магнитная индукция в воздушном зазоре между неподвижным статором и вращающимся ротором, Тл; f_1 — частота переменного тока в обмотке статора (в сети); w_1 — число последовательно соединенных витков в фазной обмотке статора

$$w_k = 2p_1 Z_k - Z_{k1} / m_1$$

w_k — число витков в катушке обмотки статора; $k_{o61} = k_{y1} k_{p1}$ — обмоточный коэффициент, учитывающий уменьшения ЭДС, вызванные укорочением шага катушки и распределенной конструкцией обмотки.

2.2. ЗАДАЧИ

Задача 2.1. Статор трехфазной бесколлекторной машины переменного тока с внутренним диаметром D_1 , длиной l_1 имеет число пазов Z_1 , число полюсов $2p$ (табл. 2.1). Определить ЭДС одной фазы обмотки статора, если шаг обмотки по пазам $y_1 = \tau$, число витков в катушке w_k , магнитная индукция в воздушном зазоре машины B_δ , а частота тока в питающей сети $f_1 = 50$ Гц.

Таблица 2.1

Параметр	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
D_1 , м	0,20	0,25	0,32	0,18	0,36	0,48	0,26	0,32	0,28	0,52
l_1 , м	0,20	0,20	0,30	0,20	0,30	0,32	0,24	0,36	0,30	0,40
Z_1	36	48	48	36	48	54	30	42	48	60
$2p$	4	4	4	2	8	6	2	4	6	8
w_k	4	3	3	3	2	2	4	3	4	2
B_δ , Тл	0,75	0,80	0,70	0,75	1,0	1,0	0,80	0,75	1,0	0,80

Решение варианта 1.

1. Полюсное деление

$$\tau = \pi D_1 / (2p) = 3,14 \cdot 0,2 / 4 = 0,157 \text{ м.}$$

2. Основной магнитный поток

$$\Phi = (2/\pi) B_\delta l_1 \tau = 0,64 \cdot 0,75 \cdot 0,20 \cdot 0,157 = 0,015 \text{ Вб.}$$

3. Число последовательно соединенных витков в фазной обмотке статора

$$Z_1 w_k / m_1 = 36 \cdot 4 / 3 = 48 \text{ витков.}$$

4. Число пазов на полюс и фазу

$$q_1 = Z_1 / (2p m_1) = 36 / (4 \cdot 3) = 3 \text{ паза.}$$

5. Коэффициент распределения и обмоточный коэффициент для первой (основной) гармоники:

$$k_{p1} = 0,960; k_{o61} = k_{p1} = 0,960.$$

6. ЭДС фазной обмотки

$$E_\Phi = 4,44 \Phi f_1 w_1 k_{o61} = 4,44 \cdot 0,015 \cdot 50 \cdot 48 \cdot 0,960 = 153 \text{ В.}$$

Задача 2.2. Используя данные табл. 2.1 и результаты расчета задачи 2.1, определить ЭДС фазной обмотки статора первой (основной) гармоники; обмотку выполнить с укороченным шагом. Рас-

считать линейную ЭДС основной гармоники при соединениях обмотки статора «звездой» и «треугольником». На сколько будут ослаблены ЭДС пятой и седьмой гармоник при принятом укорочении шага обмотки на число пазов:

Варианты	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Укорочение шага пазов	1	1	1	2	1	2	2	1	1	2

Решение варианта 1.

1. Полный (диаметральный) шаг

$$y_1 = Z_1/2p = 36/4 = 9 \text{ пазов.}$$

2. Укороченный шаг

$$y_{ук} = 9 - 1 = 8 \text{ пазов.}$$

3. Относительный шаг

$$\beta = y_{ук}/y_1 = 8/9 = 0,89.$$

4. Угол сдвига фаз между векторами пазовых ЭДС

$$\gamma = 360p/Z_1 = 360 \cdot 2/36 = 20^\circ.$$

5. Коэффициент укорочения шага для гармоник ЭДС

$$k_{yv} = \sin(\nu\beta \cdot 90^\circ);$$

для первой (основной) гармоники ($\nu = 1$)

$$k_{y1} = \sin(\beta \cdot 90^\circ) = \sin(0,89 \cdot 90^\circ) = 0,985;$$

для пятой гармоники ($\nu = 5$)

$$k_{y5} = \sin(5 \cdot 0,89 \cdot 90^\circ) = 0,649;$$

для седьмой гармоники ($\nu = 7$)

$$k_{y7} = \sin(7 \cdot 0,89 \cdot 90^\circ) = -0,353.$$

6. Коэффициенты распределения для 1, 5 и 7-й гармоник при $q_1 = 3$ (см. с. 38)

$$k_{p1} = 0,960; k_{p5} = 0,217; k_{p7} = -0,178.$$

7. Обмоточные коэффициенты

$$k_{o61} = 0,985 \cdot 0,960 = 0,946;$$

$$k_{o65} = 0,649 \cdot 0,217 = 0,140;$$

$$k_{o67} = -0,353 \cdot (-0,178) = 0,062.$$

8. ЭДС фазы основной гармоники

$$E_{\phi 1y} = 4,44\Phi f_1 w_1 k_{o61} = 4,44 \cdot 0,015 \cdot 50 \cdot 48 \cdot 0,946 = 151 \text{ В.}$$

Таким образом, укорочение шага обмотки на один паз привело к уменьшению ЭДС основной гармоники всего лишь на:

$$\frac{(E_{\phi 1} - E_{\phi y})100}{E_{\phi 1}} = \frac{(153 - 151)100}{153} \approx 1,3\%$$

При этом ЭДС 5-й гармоники уменьшится на 35 %, а седьмой гармоники — на 65 %.

9. Линейная ЭДС при соединении обмоток «треугольником» останется равной фазной ЭДС $E_{\phi y1} = 151$ В, а при соединении «звездой», она будет равна

$$E_n = 1,73 \cdot 151 = 261 \text{ В.}$$

Задача 2.3. Рассчитать параметры и начертить развернутую схему трехфазной двухслойной петлевой обмотки статора по данным, приведенным в табл. 2.2. Соединение катушечных групп последовательное (число параллельных ветвей $a = 1$).

Т а б л и ц а 2.2

Параметр	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Число полюсов $2p$	2	4	4	4	6	8	4	4	2	4
Укорочение шага пазов	2	2	1	1	1	1	2	0	1	0
Число пазов Z_1	18	32	24	36	36	48	36	24	18	36

Решение варианта 1.

1. Число пазов на полюс и фазу

$$q_1 = Z_1 / (2p m_1) = 18 / (2 \cdot 3) = 3,$$

т. е. обмотка с целым числом пазов на полюс и фазу.

2. Шаг обмотки с учетом укорочения

$$y_1 = (Z_1 / 2p - 2) - 1 = (18 / 2) - 2 = 7 \text{ пазов.}$$

3. Пазовый угол

$$\gamma = 360p / Z_1 = 360 \cdot 1 / 18 = 20 \text{ эл. град.}$$

4. Расстояние между началами фазных обмоток

$$\lambda = 120^\circ / 20 = 6 \text{ пазов.}$$

Выполнение развернутой схемы обмотки статора начинают с разметки листа на 18 пазов (рис. 2.3). В пределах каждого паза проводят две вертикальные линии, изображающие пазовые стороны обмотки, — сплошную линию (пазовая сторона верхнего слоя) и пунктирную линию (пазовая сторона нижнего слоя). Затем изображают лобовые части обмотки. С этой целью верхний конец сплошной

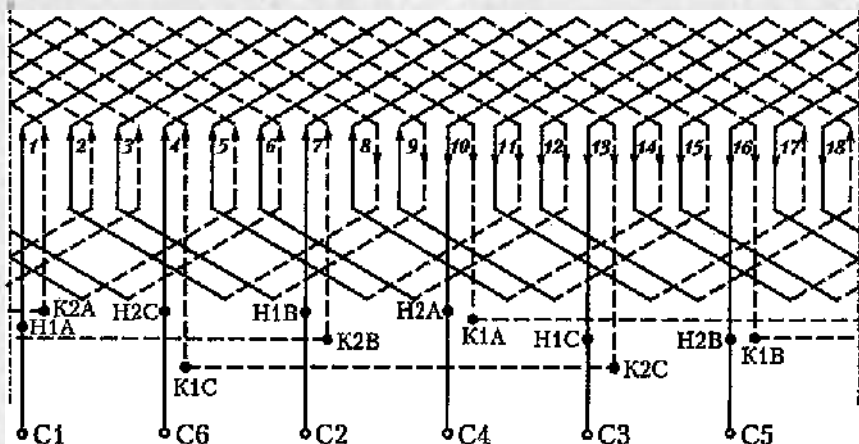


Рис. 2.3. Развернутая схема трехфазной двухслойной обмотки статора:
 $Z_1 = 18$; $2p = 2$; $m_1 = 3$; $y_1 = 7$

линии паза 1 соединяют с верхним концом пунктирной линии паза 8, т. е. паза, расположенного на расстоянии шага обмотки $y_1 = 7$ от паза 1. При этом половину лобовой части (отходящей от паза 1) изображают сплошной, а другую половину — пунктирными линиями. Нижний конец пунктирной линии паза 8 соединяют с нижним концом сплошной линии паза 2. Затем изображают следующую катушку обмотки, для чего верхний конец сплошной линии паза 2 лобовой частью соединяют с верхним концом пунктирной линии паза 9, а нижний конец этой линии соединяют с нижним концом сплошной линии паза 3. Аналогично соединив пазовые стороны паза 3 и паза 10, заканчивают построение первой катушечной группы фазной обмотки А, состоящей из $q_1 = 3$ катушек. Начало первой катушечной группы обозначим Н1А (совпадает с началом фазы С1), а конец катушечной группы обозначим К1А.

Всего в данной обмотке $18/3 = 6$ катушечных групп, т. е. по две катушечной группы в каждой фазной обмотке. Построение второй катушечной группы начинают с ее конца (обозначен К2А), которым является нижний конец пунктирной линии паза 1. Верхний конец этой линии соединяют с верхним концом сплошной линии паза 12 (отсчитываем шаг по пазам $y_1 = 7$ в обратном порядке). Затем соединяют пазовые стороны пазов 18, 11, 17 и 10. Нижний конец сплошной линии паза 10 является началом второй катушечной группы фазы А (обозначен Н2А) и он же является концом фазной обмотки фазы А (обозначен С4).

Отступив на $\lambda = 6$ пазов от начала фазы А, с пазовой стороны паза 7, начинают укладку двух катушечных групп фазной обмотки В (начало этой фазной обмотки обозначено С2). Закончив построение всех катушечных групп фазных обмоток В и С, получают раз-

вернутую схему обмотки (на рис. 2.3 обозначены начало и конец всех катушечных групп фазных обмоток).

При соединении катушечных групп следует иметь в виду: в каждой фазной обмотке конец первой катушечной группы соединен с концом второй катушечной группы, начала всех первых катушечных групп являются началами фазных обмоток, а концы всех вторых катушечных групп — концами этих фазных обмоток.

Для проверки правильности выполнения схемы следует стрелками указать направления токов в катушках. Например, в пазовых сторонах катушки 1 ток направлен снизу вверх. Когда расставим все стрелки, то увидим, что все пазы статора разделились на две части — по числу полюсов $2p = 2$. При этом в пазах 8, 9, 17 и 18 токи в пазовых сторонах направлены встречно. Это несоответствие вызвано укорочением шага обмоток. Если бы шаг был полным (диаметральным), то токи во всех пазах имели одинаковое направление. Обычно число пазов со встречным направлением токов в пазовых сторонах каждой полюсной зоны равно укорочению шага обмотки. В данном случае это число равно двум. Другим способом проверки правильности выполнения обмотки является одинаковое удаление друг от друга начал фазных обмоток и удаление их концов. В данной схеме это удаление составляет $\lambda = 6$ пазов.

Задача 2.4. Используя данные таблицы и результаты расчета задачи 2.3, определить величину основного магнитного потока Φ , если линейное значение ЭДС основной гармоник обмотки, соединенной в «звезду», равно $E_{\text{л}}$, частота тока f 50 Гц, число витков в катушке w_k (табл. 2.3).

Таблица 2.3

Параметр	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$E_{\text{л}}, \text{В}$	220	660	380	660	220	380	660	220	380	660
w_k	2	4	3	4	2	3	4	1	2	4

Решение варианта 1.

1. ЭДС фазной обмотки

$$E_1 = E_{\text{л}}/1,73 = 220/1,73 = 127 \text{ В.}$$

2. Число витков в фазной обмотке, соединенных последовательно,

$$w_1 = Z_1 w_k / m_1 = 18 \cdot 2/3 = 12 \text{ витков.}$$

3. Относительный шаг обмотки по пазам

$$\beta = y_{\text{ук}}/y_1 = 7/9 = 0,78 \approx 4/5.$$

4. Коэффициент укорочения для основной гармоники, приведенный на с. 37, $k_{y1} = 0,951$.

5. При $q_1 = 3$ коэффициент распределения $k_{p1} = 0,960$. Следовательно, обмоточный коэффициент

$$k_{об1} = 0,951 \cdot 0,960 = 0,913.$$

6. Основной магнитный поток

$$\Phi = E_1 / (4,44 f_1 w_1 k_{об1}) = 127 / (4,44 \cdot 50 \cdot 12 \cdot 0,913) = 0,052 \text{ Вб}.$$

Задача 2.5. По данным, приведенным в табл. 2.4, рассчитать параметры и выполнить развернутую схему трехфазной однослойной обмотки статора с расположением лобовых частей в двух плоскостях. Катушечные группы соединить последовательно.

Таблица 2.4

Параметр	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Z_1	24	36	54	36	18	12	24	60	48	48
$2p$	4	6	6	4	2	2	2	4	4	8

Решение варианта 1.

1. Число пазов на полюс и фазу

$$q_1 = Z_1 / (2p m_1) = 24 / (4 \cdot 3) = 2 \text{ паз}.$$

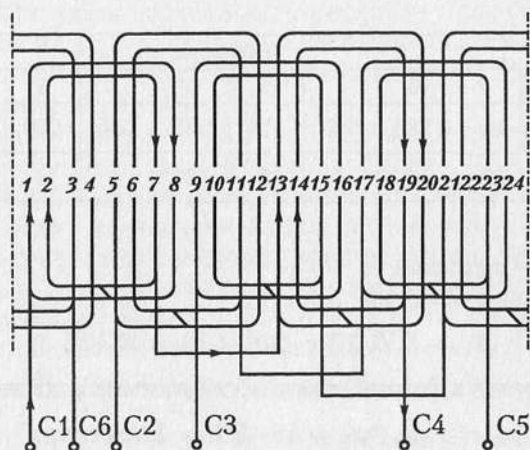


Рис. 2.4. Развернутая схема трехфазной однослойной двухплоскостной обмотки: $2p = 4$; $Z_1 = 24$; $m_1 = 3$; $y_{1cp} = 6$

2. Шаг обмотки по пазам (среднее значение)

$$y_{\text{ср}} = \tau = Z_1 / 2p = 24 / 4 = 6 \text{ пазов.}$$

3. Пазовый угол

$$\gamma = 360p / Z_1 = 360 \cdot 2 / 24 = 30^\circ.$$

4. Расстояние между началами фазных обмоток

$$120 / 30 = 4 \text{ паза.}$$

Развернутая схема обмотки представлена на рис. 2.4.

В каждой катушечной группе две катушки расположены концентрически.

Шаги этих катушек отличаются от среднего шага на один паз: для «узкой» катушки $y_I = 6 - 1 = 5$ пазов, для «широкой» катушки $y_{II} = 6 + 1 = 7$ пазов. Количество «широких» и «узких» катушек в каждой фазной обмотке должно быть одинаковым, что обеспечивает им одинаковые электрические сопротивления.

Общее число катушечных групп равно 6, т. е. в 1,5 раза больше числа полюсов.

АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ

3.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

Отличительным признаком асинхронного двигателя является отставание ротора от вращающегося магнитного поля, характеризующего величиной скольжения

$$s = (n_1 - n_2)/n_1,$$

откуда частота вращения ротора асинхронного двигателя

$$n_2 = n_1(1 - s).$$

Магнитное поле создается в асинхронном двигателе магнитодвижущей силой, величина которой определяется суммой магнитных напряжений всех участков магнитной цепи двигателя:

$$\sum F = 2F_\delta + 2F_{z1} + 2F_{z2} + F_{c1} + F_{c2}.$$

Намагничивающий ток обмотки статора

$$I_{1\mu} = \frac{p \sum F}{0,9 m_1 w_1 k_{o61}}.$$

Асинхронный двигатель аналогичен трансформатору, у которого вторичная обмотка (обмотка ротора) вращается. При этом вращающийся магнитный поток сцепляется не только с обмоткой статора, где индуцирует ЭДС E_1 , но и с обмоткой вращающегося ротора, где индуцирует ЭДС

$$E_{2s} = 4,44 \Phi f_1 s w_2 k_{o62} = E_2 s,$$

где E_2 — ЭДС, наведенная в неподвижном роторе; w_2 — число витков в обмотке ротора, для короткозамкнутого ротора $w_2 = 0,5$, а обмоточный коэффициент $k_{o62} = 1$.

Асинхронному двигателю соответствует электрическая схема замещения (рис. 3.1) и система уравнений ЭДС и токов

$$\dot{U}_1 = (-\dot{E}_1) + j\dot{I}_1 x_1 + \dot{I}_1 r_1;$$

$$\dot{E}'_2 = j\dot{I}'_2 x'_2 + \dot{I}'_2 r'_2 + \dot{I}'_2 r'_2(1-s)/s; \quad \dot{I}_1 = \dot{I}_0 + (-\dot{I}'_2).$$

В этих уравнениях, аналогично трансформаторам, параметры обмотки ротора приведены к обмотке статора.

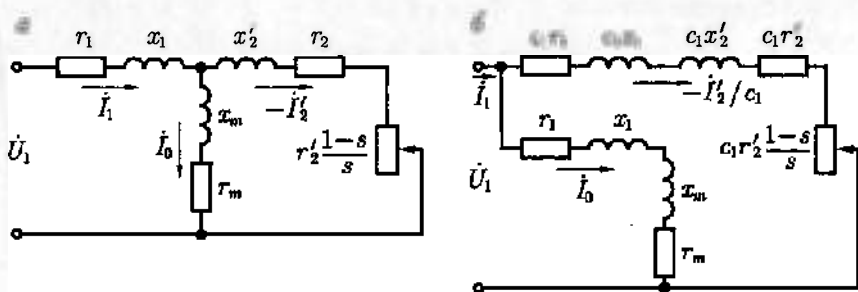


Рис. 3.1. Схемы замещения асинхронного двигателя:
а — Т-образная; б — Г-образная

Основным уравнениям асинхронного двигателя соответствует векторная диаграмма (рис. 3.2).

Приведенное значение тока в обмотке ротора асинхронного двигателя определяется выражением

$$I_2' = \frac{U_1}{\sqrt{r_1^2 + x_1^2 + r_2'^2 + x_2'^2}}$$

где r_1 — активное сопротивление обмотки статора; r_2' — приведенное значение активного сопротивления ротора; x_1 — индуктивное сопротивление обмотки статора; x_2' — приведенное значение индуктивного сопротивления ротора.

Мощность, потребляемая двигателем в номинальном режиме,

$$P_{1\text{ном}} = P_{\text{ном}} / \eta_{\text{ном}}$$

Ток, потребляемый двигателем из сети при номинальной нагрузке,

$$I_{1\text{ном}} = P_{1\text{ном}} / (3 U_1 \cos \varphi_1)$$

Суммарные потери в двигателе при номинальной нагрузке

$$\Sigma P = P_{1\text{ном}} - P_{\text{ном}}$$

Потери на нагрев обмоток двигателя в номинальном режиме

$$P_{\Sigma} = P_{\Sigma} = P_{\Sigma} = 3 I_{1\text{ном}}^2 r_1$$

Добавочные потери при номинальной нагрузке

$$P_{\text{доб}} = 0,005 P_{1\text{ном}}$$

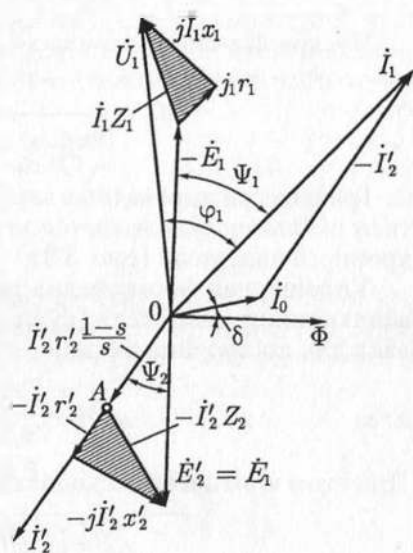


Рис. 3.2. Векторная диаграмма асинхронного двигателя

Постоянные потери

$$P_{\text{пост}} = \sum P - P_{\text{э}} - P_{\text{доб.}}$$

КПД двигателя определяется как отношение полезной мощности P_2 к потребляемой P_1

$$\eta = P_2/P_1 = 1 - \sum P/P_1.$$

Полезный момент (момент на валу) двигателя при номинальной нагрузке

$$M_{2\text{ном}} = 9,55 P_{\text{ном}}/n_{\text{ном}}.$$

Электромагнитный момент асинхронного двигателя

$$M = \frac{m_1 U_1^2 r_2' p}{2\pi f_1 s \left[(r_1 + r_2'/s)^2 + (x_1 + x_2')^2 \right]}.$$

Максимальное значение момента

$$M_{\text{max}} = \frac{m_1 U_1^2 p}{4\pi f_1 \left[\pm r_1 + \sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_2')^2} \right]}.$$

Соответствующее этому моменту критическое скольжение (упрощенное выражение)

$$s_{\text{кр}} = \pm r_2'/(x_1 + x_2').$$

Пусковой момент асинхронного двигателя

$$M_{\text{п}} = \frac{m_1 U_1^2 r_2' p}{2\pi f_1 \left[(r_1 + r_2')^2 + (x_1 + x_2')^2 \right]}.$$

Графически выраженная зависимость электромагнитного момента от скольжения называется *механической характеристикой* асинхронного двигателя (рис. 3.3).

Упрощенная формула для расчета электромагнитного момента асинхронного двигателя (формула Клосса) может быть использована для построения механической характеристики

$$M = \frac{2M_{\text{max}}}{s/s_{\text{кр}} + s_{\text{кр}}/s}.$$

При этом критическое скольжение определяют по формуле

$$s_{\text{кр}} = s_{\text{ном}} \left(\lambda_{\text{м}} + \sqrt{\lambda_{\text{м}}^2 - 1} \right),$$

где $\lambda_{\text{м}} = M_{\text{пmax}}/M_{\text{ном}}$ — перегрузочная способность двигателя.

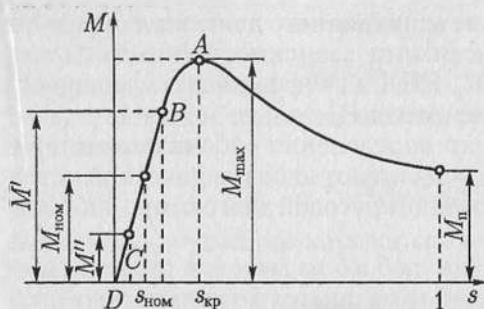


Рис. 3.3. Механическая характеристика асинхронного двигателя

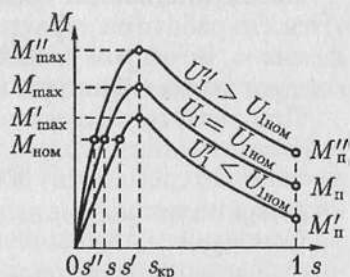


Рис. 3.4. Влияние напряжения U_1 на механические характеристики асинхронного двигателя

При расчете механической характеристики следует иметь в виду, что при значениях скольжения, превышающих критическое, точность расчетов резко снижается. Это объясняется изменением параметров схемы замещения асинхронного двигателя, вызванного магнитным насыщением зубцов статора и ротора, и увеличением частоты тока в обмотке ротора.

Форма механических характеристик асинхронного двигателя в значительной степени зависит от величин подведенного к обмотке статора напряжения U_1 (рис. 3.4) и активного сопротивления обмотки ротора r_2 (рис. 3.5).

Приводимые в каталогах на асинхронные двигатели данные обычно не содержат сведений о параметрах схемы замещения, что затрудняет применение формул для расчета электромагнитного момента. Поэтому для расчета электромагнитного момента часто применяют формулу

$$M = 9,55 m_1 I_2'^2 r_2' / (n_1 s).$$

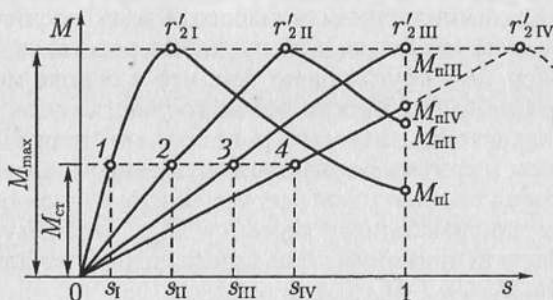


Рис. 3.5. Влияние сопротивления r'_2 на механические характеристики асинхронного двигателя

Эксплуатационные свойства асинхронного двигателя определяются его рабочими характеристиками: зависимостью частоты вращения n_2 , моментом на валу M_2 , КПД и коэффициентом мощности $\cos \varphi_1$ от полезной нагрузки двигателя P_2 .

При расчете параметров для определения рабочих характеристик асинхронных двигателей используют либо графический метод, в основе которого лежит построение круговой диаграммы, либо аналитический метод.

Основанием для выполнения любого из методов расчета рабочих характеристик служат результаты опытов холостого хода и короткого замыкания. Если же двигатель проектируется, то эти данные получают в процессе его расчета.

При расчете сопротивлений резисторов $r_{доб}$, применяемых в цепях статора или фазного ротора для ограничения пускового тока или регулирования частоты вращения, используют принцип: для данного конкретного асинхронного двигателя скольжение s пропорционально активному сопротивлению цепи ротора этого двигателя. В соответствии с этим справедливо равенство

$$(r_2 + r_{доб})/s = r_2/s_{ном}$$

где r_2 — активное сопротивление собственно обмотки ротора при рабочей температуре; s — скольжение при введенном в цепь ротора резистора сопротивлении $r_{доб}$.

Из этого выражения получим формулу для расчета активного сопротивления добавочного резистора $r_{доб}$, необходимого для получения заданного повышенного скольжения s при заданной (номинальной) нагрузке:

$$r_{доб} = r_2(s/s_{ном} - 1).$$

Существует два метода расчета пусковых реостатов: графический и аналитический.

Графический метод более точен, но требует построения естественной механической характеристики и пусковой диаграммы двигателя, что связано с выполнением большого объема графических работ.

Аналитический метод расчета пусковых реостатов более прост, но менее точен. Это обусловлено тем, что в основе метода лежит допущение о прямолинейности рабочего участка естественной механической характеристики асинхронного двигателя. Но при скольжении близком к критическому это допущение вызывает заметную ошибку, которая тем значительнее, чем ближе начальный пусковой момент M_1 к максимальному моменту M_{max} . Поэтому аналитический метод расчета применим лишь при значениях начального пускового момента $M_1 \leq 0,7 M_{max}$.

Сопротивления резисторов на ступенях пускового реостата:

$$\text{третьей } r_{доб3} = r_2(\lambda_3 - 1);$$

$$\text{второй } r_{\text{доб2}} = r_{\text{доб3}} \lambda_m;$$

$$\text{первой } r_{\text{доб1}} = r_{\text{доб2}} \lambda_m;$$

где r_2 — активное сопротивление фазной обмотки ротора асинхронного двигателя,

$$r_2 = [E_2 s_{\text{ном}} / (\sqrt{3} I_{2\text{ном}})],$$

где E_2 и $I_{2\text{ном}}$ — данные каталога на выбранный типоразмер двигателя.

Сопротивления пускового реостата на его ступенях:

$$\text{первой } R_{\text{ПР1}} = r_{\text{доб1}} + r_{\text{доб2}} + r_{\text{доб3}};$$

$$\text{второй } R_{\text{ПР2}} = r_{\text{доб2}} + r_{\text{доб3}};$$

$$\text{третьей } R_{\text{ПР3}} = r_{\text{доб3}}.$$

Для ограничения пускового тока асинхронных двигателей с *короткозамкнутым ротором* применяют специальные схемы их включения с элементами, ограничивающими пусковой ток. Все эти методы основаны на снижении подводимого к обмотке статора напряжения. Наибольшее применение получили схемы с включением в линейные провода статора резисторов или дросселей (см. рис. 3.14, б). Расчет требуемого сопротивления этих элементов при заданном снижении пускового тока α_i относительно его естественного значения ведется по формулам:

для резисторов с активным сопротивлением

$$R_{\text{п}} = \sqrt{\left(Z_{\text{к}}/\alpha_i\right)^2 - x_{\text{к}}^2 - r_{\text{к}}},$$

для дросселей

$$x_L = \sqrt{\left(Z_{\text{к}}/\alpha_i\right)^2 - r_{\text{к}}^2 - x_{\text{к}}}.$$

Полное сопротивление двигателя в режиме короткого замыкания $Z_{\text{к}}$, Ом,

$$Z_{\text{к}} = U_1 / I_{\text{п}}.$$

Здесь $x_{\text{к}}$ и $r_{\text{к}}$ — индуктивная и активная составляющие этого сопротивления

$$r_{\text{к}} = Z_{\text{к}} \cos \varphi_{\text{к}}; \quad x_{\text{к}} = \sqrt{Z_{\text{к}}^2 - r_{\text{к}}^2}.$$

Уменьшение искусственного пускового момента при включении R или L составит

$$M'_{\text{п}} = \alpha_{\text{м}} M_{\text{п}},$$

где

$$\alpha_{\text{м}} = \alpha_i^2.$$

Электрические машины	Высота оси вращения h , мм	K_t
Постоянного тока общепромышленного назначения	80—200	1,22
	225—500	1,38
Асинхронные общепромышленного назначения	50—132	1,22
	160—355	1,38
Специального назначения, с тяжелыми условиями эксплуатации	—	1,38

Таким образом, если задано значение α_m , определяющее величину искусственного пускового момента $M'_{п}$, то для расчета соответствующих значений R_n или x_L можно воспользоваться приведенными выше формулами, подставив в них вместо α_1^2 величину α_m .

Электрическое сопротивление обмоток двигателей, приведенных в каталогах, обычно соответствуют температуре $+20^\circ\text{C}$. Но при расчетах характеристик и параметров двигателей сопротивления их обмоток необходимо приводить к рабочей температуре. В соответствии с действующим стандартом величина рабочей температуры принимается в зависимости от класса нагревостойкости электрической изоляции, примененной в двигателе: при классе нагревостойкости В рабочая температура равна 75°C , а при классах нагревостойкости F и H — 115°C . Пересчет сопротивлений обмоток на рабочую температуру выполняется путем умножения сопротивления обмотки при температуре 20°C , на коэффициент нагрева K_t :

$$r = r_{20} K_t.$$

Значения этого коэффициента принимают в зависимости от назначения двигателей и их габаритов (высоты оси вращения) (табл. 3.1).

3.2. ЗАДАЧИ

Скольжение, ЭДС и токи асинхронных двигателей

Задача 3.1. В табл. 3.2 приведены данные следующих параметров трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором: основной магнитный поток Φ , число последовательно соединенных витков w_1 в обмотке статора, номинальное скольжение $s_{ном}$, ЭДС, индуцируемая в обмотке ротора при его неподвижном состоянии E_2 , и ЭДС ротора при его вращении с номинальным скольжением E_{2s} , частота этой ЭДС f_2 при частоте вращения ротора $n_{ном}$. Частота тока в питающей сети 50 Гц. Требуется определить значения параметров, не указанные в таблице в каждом из вариантов.

Таблица 3.2

Параметр	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Φ , Вб	0,028	0,032	0,048	—	0,025	—	—	0,028	0,028	—
w_1 , витков	18	—	24	16	—	24	18	—	36	18
$k_{об1}$	0,95	0,96	0,96	0,98	0,98	0,96	0,95	0,95	0,98	0,98
$s_{ном}$	0,04	—	0,05	0,04	—	0,05	—	—	—	—
$2p$	4	6	2	4	—	8	4	8	—	4
$E_{1\phi}$, В	—	210	—	98	110	200	—	120	—	100
E_2 , В	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
E_{2s} , В	—	—	—	—	—	—	0,13	—	—	—
f_2 , Гц	—	—	—	—	—	—	2,5	3,2	—	2,5
$n_{ном}$, об/мин	—	970	—	—	2920	—	—	—	1470	—

Решение варианта 1.

1. ЭДС обмотки статора

$$E_{1\phi} = 4,44\Phi f_1 w_1 k_{об1} = 4,44 \cdot 0,028 \cdot 50 \cdot 18 \cdot 0,95 = 106 \text{ В.}$$

2. ЭДС обмотки ротора при номинальной частоте вращения

$$E_{2s} = 4,44\Phi f_1 s_{ном} w_2 k_{об2} = 4,44 \cdot 0,028 \cdot 50 \cdot 0,04 \cdot 0,5 \cdot 1 = 0,12 \text{ В.}$$

3. ЭДС обмотки неподвижного ротора

$$E_2 = E_{2s}/s_{ном} = 0,12/0,04 = 3 \text{ В.}$$

4. Частота ЭДС ротора при номинальном скольжении

$$f_2 = f_1 s_{ном} = 50 \cdot 0,04 = 2 \text{ Гц.}$$

5. Частота вращения ротора номинальная

$$n_{ном} = n_1(1 - s_{ном}) = 1500(1 - 0,04) = 1440 \text{ об/мин,}$$

где синхронная частота вращения при частоте тока 50 Гц и $2p = 4$, $n_1 = 1500$ об/мин.

Задача 3.2. Трехфазный асинхронный двигатель с фазным ротором имеет данные, приведенные в табл. 3.3: максимальное значение магнитной индукции в воздушном зазоре B_δ , диаметр расточки статора D_1 , длина сердечника статора l_1 , равная $0,8D_1$, число полюсов в обмотках статора и ротора $2p$, число последовательно соединенных витков в фазных обмотках статора w_1 и ротора w_2 , обмоточ-

Параметр	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
B_8 , Тл	1,5	1,35	1,50	1,40	1,45	1,50	1,38	1,45	1,50	1,38
D_1 , мм	180	160	228	235	160	300	280	320	360	290
l_1 , мм	141	130	180	190	130	250	250	270	300	250
$2p$	4	4	4	6	4	4	6	4	8	6
w_1	48	18	24	32	48	36	32	36	12	24
w_2	8	4	6	10	16	12	16	18	8	12
s , %	8	12	10	6	5	12	8	10	6	8

ные коэффициенты для основной гармоник статора k_{061} и ротора k_{062} принять равными $k_{061} = k_{062} = 0,93$. Требуется определить фазные значения ЭДС в обмотке статора E_1 и в обмотке фазного ротора при неподвижном его состоянии E_2 и вращающемся со скольжением s , частоту тока в неподвижном и вращающемся роторе. Частота тока в питающей сети $f_1 = 50$ Гц.

Решение варианта 1.

1. Полусное деление

$$\tau = \pi D_1 / 2p = 3,14 \cdot 180 / 4 = 141 \text{ мм.}$$

2. Основной магнитный поток

$$\Phi = (2/\pi) B_8 l_1 \tau = (2/\pi) 1,5 \cdot 0,8 \cdot 180 \cdot 10^{-3} \cdot 141 \cdot 10^{-3} = 0,019 \text{ Вб.}$$

3. ЭДС фазной обмотки статора

$$E_1 = 4,44 f_1 \Phi w_1 k_{061} = 4,44 \cdot 50 \cdot 0,019 \cdot 48 \cdot 0,93 = 188 \text{ В.}$$

4. ЭДС в обмотке неподвижного ротора

$$E_2 = 4,44 f_1 \Phi w_2 k_{062} = 4,44 \cdot 50 \cdot 0,019 \cdot 8 \cdot 0,93 = 31 \text{ В.}$$

5. ЭДС во вращающемся роторе при скольжении 8 %

$$E_{2s} = E_2 s = 31 \cdot 0,08 = 2,5 \text{ В.}$$

6. Частота тока в неподвижном роторе $f_2 = f_1 = 50$ Гц. Частота тока во вращающемся роторе при скольжении 8 %

$$f_2 = f_1 s = 50 \cdot 0,08 = 4 \text{ Гц.}$$

Задача 3.3. Трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором серии 4А имеет технические данные, приведенные в табл. 3.4. Определить высоту оси вращения h , число полюсов $2p$,

Таблица 3.4

Тип двигателя	$P_{\text{ном}}$ кВт	$n_{\text{ном}}$ об/мин	$\eta_{\text{ном}}$ %	$\cos \varphi_1$	$\frac{I_{\text{п}}}{I_{\text{ном}}}$	$\frac{M_{\text{п}}}{M_{\text{ном}}}$	$\frac{I_{\Sigma}}{I_{\text{ном}}}$	U_1 , В
4A100S2Y3	4,0	2880	86,5	0,89	7,5	2,0	2,5	220/380
4A160S2Y3	15,0	2940	88,0	0,91	7,0	1,4	2,2	220/380
4A200M2Y3	37,0	2945	90,0	0,89	7,5	1,4	2,5	380/660
4A112M4Y3	5,5	1445	85,5	0,85	7,0	2,0	2,2	220/380
4A132M4Y3	11,0	1460	87,5	0,87	7,5	2,2	3,0	220/380
4A180M4Y3	30,0	1470	91,0	0,89	6,5	1,4	2,3	380/660
4A200M6Y3	22,0	975	90,0	0,90	6,5	1,3	2,4	220/380
4A280M6Y3	90,0	985	92,5	0,89	5,5	1,4	2,2	380/660
4A315M8Y3	110	740	93,0	0,85	6,5	1,2	2,3	380/660
4A355M10Y3	110	590	93,0	0,83	6,0	1,0	1,8	380/660

скольжение при номинальной нагрузке $s_{\text{ном}}$, момент на валу $M_{\text{ном}}$, начальный пусковой $M_{\text{п}}$ и максимальный $M_{\text{мах}}$ моменты, потребляемую двигателем из сети активную мощность $P_{1\text{ном}}$, суммарные потери при номинальной нагрузке ΣP , номинальный и пусковой токи $I_{1\text{ном}}$ и $I_{\text{п}}$ в питающей сети при соединении обмоток статора «звездой» и «треугольником».

Решение варианта с двигателем 4A100S2Y3.

1. В обозначении типоразмера двигателя цифры, стоящие после обозначения серии 4A, указывают на высоту оси вращения, т.е. $h = 100$ мм.

2. Следующая далее цифра указывает на число полюсов, т.е. $2p = 2$; при частоте переменного тока 50 Гц этому числу полюсов соответствует синхронная частота вращения $n_1 = 3000$ об/мин.

3. Скольжение при номинальной нагрузке определяется номинальной частотой вращения ротора двигателя

$$s_{\text{ном}} = (n_1 - n_{2\text{ном}})/n_1 = (3000 - 2880)/3000 = 0,04 \text{ или } 4 \, \%.$$

4. Момент на валу двигателя (полезный момент двигателя) при номинальной нагрузке, т.е. при номинальной частоте вращения 2820 об/мин

$$M_2 = 9,55 P_{\text{ном}}/n_{2\text{ном}} = 9,55 \cdot 4000/2880 = 13,26 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

5. Начальный пусковой момент

$$M_{\text{п}} = M_{\text{ном}}(M_{\text{п}}/M_{\text{ном}}) = 13,26 \cdot 2 = 26,52 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

6. Максимальный (критический) момент двигателя определяют по его перегрузочной способности

$$M_{\max} = M_{\text{ном}}(M_{\max}/M_{\text{ном}}) = 13,26 \cdot 2,5 = 33,15 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

7. Номинальный ток в фазной обмотке статора

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

8. Потребляемая двигателем из сети активная мощность в режиме номинальной нагрузки

$$P_{\text{ном}} = P_{\text{ном}}/\eta_{\text{ном}} = 4/0,865 = 4,6 \text{ кВт}.$$

9. Суммарные потери двигателя при номинальной нагрузке

$$\Sigma P = P_{\text{ном}} - P_{\text{ном}} = 4,6 - 4,0 = 0,6 \text{ кВт}.$$

10. Линейный ток статора:

при соединении обмоток статора «звездой»

$$I_{\text{лY}} = I_1 = 7,9 \text{ А},$$

при соединении обмоток статора «треугольником»

$$I_{\text{л}\Delta} = 1,73 I_1 = 1,73 \cdot 7,9 = 13,5 \text{ А}.$$

Задача 3.4. В табл. 3.5 приведены значения следующих параметров трехфазного асинхронного двигателя: односторонний воздушный зазор между статором и ротором δ , число полюсов $2p$, число пазов Z_1 , максимальное значение магнитной индукции в воздушном зазоре B_δ , число витков в одной катушке обмотки статора w_k (все катушки фазной обмотки соединены последовательно), обмо-

Таблица 3.5

Параметр	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
δ , мм	0,6	0,4	0,8	0,5	0,7	0,3	0,4	0,7	0,5	0,6
$2p$	6	4	8	6	6	2	4	6	4	8
Число пазов Z_1	24	24	48	36	60	18	36	48	32	54
B_δ , Тл	0,9	0,8	0,9	1,0	0,7	0,8	0,8	1,0	0,7	0,9
Число витков w_k	8	7	6	8	5	4	5	5	6	4
$k_{\text{об1}}$	0,91	0,95	0,92	0,94	0,96	0,92	0,92	0,94	0,93	0,92
k_μ	1,37	1,35	1,38	1,40	1,35	1,40	1,34	1,37	1,35	1,38
k_δ	1,30	1,35	1,36	1,38	1,34	1,37	1,35	1,36	1,34	1,38

точный коэффициент обмотки статора для основной гармоники $k_{об1}$, коэффициент магнитного насыщения k_μ , коэффициент воздушного зазора k_δ . Необходимо определить величину намагничивающего тока статора $I_{1\mu}$ при заданном воздушном зазоре, а также определить величину этого тока при увеличении и уменьшении воздушного зазора на 25 % относительно заданного; дать заключение о влиянии величины воздушного зазора на величину намагничивающего тока; чем ограничивается применение в асинхронных двигателях слишком малых воздушных зазоров.

Решение варианта 1.

1. Магнитное напряжение воздушного зазора

$$F_\delta = 0,8 B_\delta \delta k_\delta \cdot 10^3 = 0,8 \cdot 0,9 \cdot 0,6 \cdot 1,3 \cdot 10^3 = 562 \text{ А.}$$

2. МДС обмотки статора на пару полюсов в режиме холостого хода при номинальном подведенном напряжении

$$\Sigma F_{ном} = 2 F_\delta k_\mu = 2 \cdot 562 \cdot 1,37 = 1540 \text{ А.}$$

3. Число последовательно соединенных витков фазной обмотки статора

$$w_1 = Z_1 w_k / m_1 = 24 \cdot 8 / 3 = 64 \text{ витка.}$$

4. Намагничивающий ток статора

$$I_{1\mu} = p \Sigma F_{ном} / (0,9 m_1 w_1 k_{об1}) = 3 \cdot 1540 / (0,9 \cdot 3 \cdot 64 \cdot 0,91) = 29,4 \text{ А.}$$

5. При изменении размера воздушного зазора, при постоянных значениях других параметров намагничивающий ток изменяется пропорционально зазору. Поэтому при увеличении зазора на 25 % настолько же возрастает намагничивающий ток, что ведет к росту электрических потерь двигателя, величина которых пропорциональна квадрату тока в обмотках. Наоборот, при уменьшении воздушного зазора намагничивающий ток уменьшается, что способствует снижению потерь в двигателе, т. е. повышению его КПД. Таким образом, на первый взгляд создается впечатление, что зазор асинхронного двигателя должен быть минимальным. Однако такое мнение лишь отчасти справедливо, так как с уменьшением зазора повышаются требования к точности обработки деталей и качеству подшипников. И то и другое ведет к повышению стоимости изготовления двигателя, а при чрезмерно малых зазорах технически невозможно обеспечить надежную работу двигателя из-за опасности задевания вращающегося ротора о неподвижный статор. Поэтому, в зависимости от размеров двигателя и предъявляемых к нему требований, принимают оптимальный размер зазора, принятый на основании опыта проектирования и эксплуатации асинхронных двигателей.

Задача 3.5. Трехфазный асинхронный двигатель с фазным ротором имеет эффективное число витков в фазных обмотках статора

Параметр	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$w_1 k_{\phi 61}$	18	24	—	32	—	36	—	24	—	48
$w_2 k_{\phi 62}$	12	—	18	—	12	—	18	—	16	—
E_1 , В	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
E_2 , В	—	93	—	105	—	104	—	98	—	110
E_{2s} , В	—	5,58	6,5	5,25	5,8	—	4,0	5,8	4,6	—
s	0,05	—	0,04	—	0,07	0,05	0,03	—	0,05	0,04

$w_1 k_{\phi 61}$ и ротора $w_2 k_{\phi 62}$, ЭДС фазной обмотки статора $E_1 = 0,95 U_1$, ЭДС фазной обмотки неподвижного ротора E_2 , а вращающегося со скольжением s , равно E_{2s} . Используя приведенные в табл. 3.6 значения параметров, определить неуказанные значения, если напряжение питания двигателя $U_1 = 220/380$ В.

Решение варианта 1.

1. ЭДС фазы обмотки статора

$$E_1 = 0,95 U_1 = 0,95 \cdot 220 = 209 \text{ В.}$$

2. Коэффициент трансформации по ЭДС

$$k_e = w_1 k_{\phi 61} / w_2 k_{\phi 62} = 18/12 = 1,5.$$

3. ЭДС фазной обмотки неподвижного ротора

$$E_2 = E_1 / k_e = 209 / 1,5 = 139 \text{ В.}$$

4. ЭДС фазной обмотки вращающегося ротора

$$E_{2s} = E_2 s = 139 \cdot 0,05 = 7 \text{ В.}$$

Потери и КПД, электромагнитный момент, механическая характеристика

Задача 3.6. Трехфазный асинхронный двигатель включен в сеть напряжением 380 В, частотой 50 Гц, обмотка статора соединена «звездой». Статический нагрузочный момент на валу двигателя M_c , полезная мощность двигателя $P_{\text{ном}}$, потребляемая из сети мощность $P_{1\text{ном}}$, КПД $\eta_{\text{ном}}$, коэффициент мощности $\cos \varphi_1$, величина тока в фазной обмотке статора $I_{1\text{ном}}$, число полюсов $2p$, скольжение $s_{\text{ном}}$. Некоторые из перечисленных параметров указаны в табл. 3.7. Требуется определить значения недостающих параметров.

Таблица 3.7

Параметр	Варианты					
	1	2	3	4	5	6
$P_{\text{ном}}, \text{кВт}$	—	12	—	15	22	—
$P_{1\text{ном}}, \text{кВт}$	—	14,6	—	—	27,8	35
$\eta_{\text{ном}}, \%$	82	—	85	89	—	90
$\cos \varphi_1$	0,80	0,78	0,80	—	0,78	—
$I_{1\text{ном}}, \text{А}$	—	—	18	30	—	62
$M_c, \text{Н} \cdot \text{м}$	180	—	105	—	145	—
$s_{\text{ном}}, \%$	4	3,5	—	3	—	3
$2p$	6	4	—	4	4	6

Решение варианта 1.

1. Номинальная частота вращения

$$n_{\text{ном}} = n_1(1 - s_{\text{ном}}) = 1000(1 - 0,04) = 960 \text{ об/мин.}$$

2. Полезная мощность двигателя

$$P_{\text{ном}} = 0,105 M_c n_{\text{ном}} = 0,105 \cdot 180 \cdot 960 = 18\,144 \text{ Вт.}$$

3. Потребляемая двигателем мощность

$$P_{1\text{ном}} = P_{\text{ном}} / \eta_{\text{ном}} = 18\,144 / 0,82 = 22\,126 \text{ Вт.}$$

4. Потребляемый двигателем ток статора

$$I_{1\text{ном}} = P_{1\text{ном}} / (m_1 U_1 \cos \varphi_1) = 22\,126 / (3 \cdot 220 \cdot 0,8) = 41,9 \text{ А.}$$

Задача 3.7. Трехфазный асинхронный двигатель с числом полюсов $2p = 4$ включен в сеть напряжением 380 В, частотой 50 Гц при соединении обмотки статора «треугольником». В табл. 3.8 приведе-

Таблица 3.8

Параметр	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$P_{\text{ном}}, \text{кВт}$	3,0	4,0	5,5	7,5	11	15	18,5	22	30	37
$\eta_{\text{ном}}, \%$	81,5	82	85	85,5	86	87,5	88	90	90,5	91
$s_{\text{ном}}, \%$	5,5	5,0	4,0	3,3	3,0	3,0	2,7	2,5	2,3	2,0
$\cos \varphi_1$	0,76	0,80	0,82	0,84	0,86	0,87	0,89	0,89	0,90	0,90

ны параметры двигателя, соответствующие его номинальной нагрузке: мощность двигателя $P_{ном}$, КПД $\eta_{ном}$, коэффициент мощности $\cos \varphi_1$. При нагрузке $P_2 = 0,85 P_{ном}$ КПД двигателя имеет наибольшее значение $\eta_{max} = 1,03 \eta_{ном}$. Необходимо определить все остальные виды потерь двигателя для режима номинальной нагрузки.

Решение варианта 1.

1. Наибольшее значение КПД

$$\eta_{max} = 1,03 \eta_{ном} = 1,03 \cdot 0,81 = 0,834 \%$$

2. Нагрузка двигателя при этом КПД

$$P_2 = 0,85 P_{ном} = 0,85 \cdot 3 = 2,55 \text{ кВт.}$$

3. Потребляемая мощность при η_{max}

$$P_1 = P_2 / \eta_{max} = 2,55 / 0,834 = 3,06 \text{ кВт.}$$

4. Суммарные потери при η_{max}

$$\Sigma P = P_1 - P_2 = 3,06 - 2,55 = 0,57 \text{ кВт.}$$

5. Постоянные потери двигателя

$$P_{пост} = P_m + P_{мех} = 0,5 \Sigma P = 0,5 \cdot 570 = 285 \text{ Вт.}$$

6. Потребляемая мощность в номинальном режиме

$$P_{1ном} = P_{ном} / \eta_{ном} = 3,0 / 0,81 = 3,7 \text{ кВт.}$$

7. Суммарные потери в номинальном режиме

$$\Sigma P_{ном} = P_{1ном} - P_{ном} = 3,7 - 3,0 = 0,7 \text{ кВт} = 700 \text{ Вт.}$$

8. Переменные потери в номинальном режиме

$$P_{пер} = P_2 + P_{доб} = \Sigma P_{ном} - P_{пост} = 700 - 285 = 415 \text{ Вт.}$$

9. Момент в режиме холостого хода

$$M_0 = 9,55 P_{пост} / n_1 = 9,55 \cdot 285 / 1500 = 1,8 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

10. Номинальная частота вращения

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

11. Полезный момент на валу двигателя при номинальной нагрузке

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

12. Электромагнитный момент при номинальной нагрузке

$$M_{ном} = M_2 + M_0 = 20,2 + 1,8 = 22 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

13. Номинальное значение электромагнитной мощности

$$P_{эм} = 0,105 M_{ном} n_1 = 0,105 \cdot 22 \cdot 1500 = 3465 \text{ Вт.}$$

14. Электрические потери в обмотке ротора

$$P_{э2} = s_{\text{ном}} P_{\text{эм}} = 0,055 \cdot 3465 = 190 \text{ Вт.}$$

15. Добавочные потери

$$P_{\text{доб}} = 0,005 P_{\text{ном}} = 0,005 \cdot 3700 = 18 \text{ Вт.}$$

16. Электрические потери в номинальном режиме

$$P_{э} = P_{\text{пер}} - P_{\text{доб}} = 415 - 18 = 397 \text{ Вт,}$$

17. Электрические потери в обмотке статора

$$P_{э1} = P_{э} - P_{э2} = 397 - 190 = 207 \text{ Вт.}$$

18. Проверка:

$$\begin{aligned} \Sigma P_{\text{ном}} &= P_{\text{пост}} + P_{э1} + P_{э2} + P_{\text{доб}} = 285 + 207 + 190 + 18 = \\ &= 700 \text{ Вт (см. п. 7).} \end{aligned}$$

Задача 3.8. В табл. 3.9 приведены технические данные трехфазных асинхронных двигателей с фазным ротором серии 4АК. Требуется определить все виды потерь при номинальной нагрузке двигателя. Напряжение питания 660 В, обмотка статора соединена «звездой»; частота тока 50 Гц; кратность пускового тока $\lambda_i = 5,7$; коэффициент мощности короткого замыкания принять $\cos \varphi_k = 0,5 \cos \varphi_1$.

Таблица 3.9

Тип двигателя	$P_{\text{ном}}, \text{ кВт}$	$\eta_{\text{ном}}, \%$	$\cos \varphi_1$	$s_{\text{ном}}, \%$	$\frac{M_{\text{ном}}}{P_{\text{ном}}}$
Синхронная частота вращения 1500 об/мин					
4АК160S4У3	11	86,5	0,86	5	3
4АК160М4У3	14	88,5	0,87	4	3,5
4АК180М4У3	18	89	0,88	3,5	4
4АК200М4У3	22	90	0,87	2,5	4
4АК200L4У3	30	90,5	0,87	2,5	4
4АК225М4У3	37	90	0,87	3,5	3
4АК250SA4У3	45	91	0,88	3	3
4АК250SB4У3	55	90,5	0,9	3	3
4АК250М4У3	71	90,5	0,86	2,5	3
Синхронная частота вращения 1000 об/мин					
4АК160S6У3	7,5	82,5	0,77	5	3,5
4АК160М6У3	10	84,5	0,76	4,5	3,8

Решение варианта 4АК160М6УЗ.

1. Мощность, потребляемая двигателем в номинальном режиме

$$P_{\text{ном}} = P_{\text{ном}}/\eta_{\text{ном}} = 10/0,845 = 11,8 \text{ кВт.}$$

2. Номинальный ток двигателя

$$I_{\text{ном}} = P_{\text{ном}}/(m_1 U_1 \cos \varphi_1) = 11\,800/(3 \cdot 380 \cdot 0,76) = 13,6 \text{ А.}$$

3. Суммарные потери

$$\Sigma P = P_{\text{ном}} - P_{\text{ном}} = 11,8 - 10 = 1,8 \text{ кВт.}$$

4. Пусковой ток двигателя при прямом включении

$$I_{\text{п}} = I_{\text{ном}} \lambda_i = 13,6 \cdot 5,7 = 77,9 \text{ А.}$$

5. Сопротивление короткого замыкания двигателя

$$Z_k = U_1/I_{\text{п}} = 380/77,9 = 4,88 \text{ Ом.}$$

6. Активная составляющая этого сопротивления

$$r_k = z_k \cos \varphi_k = 4,88 \cdot 0,38 = 1,85 \text{ Ом,}$$

где $\cos \varphi_k = 0,5 \cos \varphi_1 = 0,5 \cdot 0,76 = 0,38$.

7. Электрические потери в обмотках статора и ротора в режиме номинальной нагрузки

$$P_{\text{э}} = 3I_{\text{ном}}^2 r_k = 3 \cdot 13,6^2 \cdot 1,85 = 1026 \text{ Вт.}$$

8. Добавочные потери

$$P_{\text{доб}} = 0,005 \cdot P_{\text{ном}} = 0,005 \cdot 11\,800 = 59 \text{ Вт.}$$

9. Переменные потери в режиме номинальной нагрузки

$$P_{\text{пер}} = P_{\text{э}} + P_{\text{доб}} = 1026 + 59 = 1085 \text{ Вт.}$$

10. Постоянные потери (магнитные и механические)

$$P_{\text{м}} + P_{\text{мех}} = \Sigma P - P_{\text{э}} - P_{\text{доб}} = 1800 - 1026 - 59 = 715 \text{ Вт.}$$

Задача 3.9. Используя данные и результаты решения задачи 3.8, определить КПД двигателя при значениях коэффициента нагрузки $\beta = I_1/I_{\text{ном}} = 0,25; 0,50; 0,75$ и $1,10$ и построить график $\eta = f(P_2/P_{\text{ном}})$. При определении значений коэффициента мощности $\cos \varphi_1$ следует воспользоваться графиком рис. 3.6, кроме значений при $\beta = 1,0$ и $1,1$, которые следует принять соответствующими номинальной нагрузке из таблицы технических данных двигателя.

Решение варианта с двигателем 4АК160М6УЗ (см. табл. 3.9).

Постоянные потери $P_{\text{пост}} = P_{\text{м}} + P_{\text{мех}} = 521 \text{ Вт}$ от нагрузки не зависят, а переменные потери $P_{\text{пер}} = P_{\text{э}} + P_{\text{доб}}$ пропорциональны β^2 .

Ниже приведен расчет требуемых параметров для коэффициента нагрузки $\beta = 0,5$.

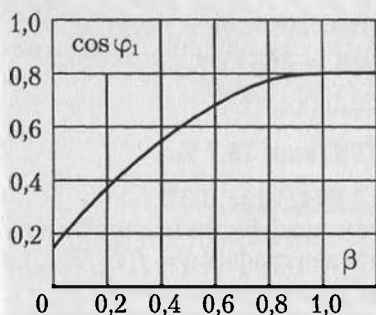


Рис. 3.6. График $\cos \varphi_1 = f(\beta)$

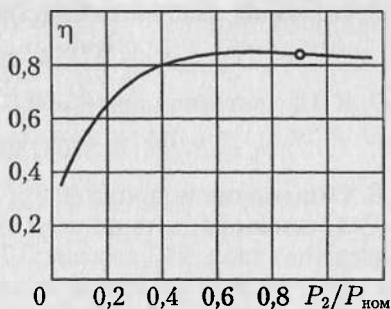


Рис. 3.7. Зависимость $\eta = f(P_2/P_{ном})$

1. Ток в обмотке статора

$$I_1 = 0,5 I_{ном} = 0,5 \cdot 13,6 = 6,8 \text{ А.}$$

2. Коэффициент мощности при $\beta = 0,5$ по графику рис. 3.6

$$\cos \varphi_1 = 0,6.$$

3. Потребляемая двигателем мощность

$$P_1 = 3 U_1 I_1 \cos \varphi_1 = 3 \cdot 380 \cdot 6,8 \cdot 0,6 = 4650 \text{ Вт.}$$

4. Переменные потери

$$P_{пер} = 1085 \cdot \beta^2 = 1085 \cdot 0,5^2 = 271 \text{ Вт.}$$

5. Суммарные потери при $\beta = 0,5$

$$\Sigma P = P_{пост} + P_{пер} = 715 + 271 = 986 \text{ Вт.}$$

Таблица 3.10

Парамстр	Значения параметров				
β	0,25	0,5	0,75	1,0	1,1
η	0,0625	0,25	0,56	1,0	1,21
$P_{пост}, \text{ Вт}$	715	715	715	715	715
$\cos \varphi_1$	0,4	0,6	0,74	0,76	0,76
$\Sigma P, \text{ Вт}$	780	986	1298	1756	1975
$I_{1ном}, \text{ А}$	3,4	6,8	10,2	13,6	15
$P_{пер}, \text{ Вт}$	65	271	583	1041	1260
$P_1, \text{ Вт}$	1506	4650	8560	11 756	12 902
$P_2, \text{ Вт}$	726	3631	7262	10 000	10 927
η	0,48	0,79	0,88	0,850	0,846
$P_2/P_{ном}$	0,07	0,36	0,73	1,0	1,09

6. Полезная мощность при $\beta = 0,5$

$$P_2 = P_1 - \sum P = 4650 - 986 = 3664 \text{ Вт.}$$

7. КПД двигателя при $\beta = 0,5$

$$\eta = P_2/P_1 = 3664/4650 = 0,787 \text{ или } 78,7 \%.$$

8. Отношение мощностей $P_2/P_{\text{ном}} = 3,664/10 = 0,37$.

Результаты расчета по всем значениям коэффициента нагрузки приведены в табл. 3.10, а на рис. 3.7 представлен график $\eta = f(P_2/P_{\text{ном}})$.

Задача 3.10. Трехфазный асинхронный двигатель с фазным ротором и числом полюсов $2p$ включен в сеть напряжением $U_{\text{л}} = 380 \text{ В}$ частотой $f_1 = 50 \text{ Гц}$ при соединении обмоток статора «звездой». ЭДС ротора в режиме холостого хода, измеренная на контактных кольцах неподвижного ротора, E_{20} . Обмотки статора и ротора обладают сопротивлениями r_1 и x_1 , r_2 и x_2 соответственно (табл. 3.11). Требуется определить: частоту вращения ротора при номинальной нагрузке $n_{\text{ном}}$, электромагнитный момент в номинальном режиме $M_{\text{ном}}$, перегрузочную способность и номинальную мощность двигателя $P_{\text{ном}}$. Механические потери принять $P_{\text{мех}} = 3P_{\text{доб}}$.

Решение варианта 1.

1. Приведенные значения сопротивлений в цепи ротора

$$r'_2 = r_2 k_e^2 = 0,044 \cdot 1,34^2 = 0,08 \text{ Ом;}$$

$$x'_2 = x_2 k_e^2 = 0,089 \cdot 1,34^2 = 0,16 \text{ Ом,}$$

где k_e — коэффициент трансформации между обмотками статора и неподвижного ротора

$$k_e = 0,95 \cdot U_{\text{л}}/E_{20} = 0,95 \cdot 380/270 = 1,34;$$

у двигателей с фазным ротором $k_e = k_i$.

Таблица 3.11

Параметр	Варианты				
	1	2	3	4	5
r_1 , Ом	0,21	0,04	0,065	0,035	0,055
x_1 , Ом	0,20	0,09	0,11	0,073	0,16
r_2 , Ом	0,044	0,031	0,027	0,020	0,033
x_2 , Ом	0,089	0,082	0,07	0,10	0,082
E_{20} , В	270	360	290	250	267
$2p$	8	10	10	10	10
$s_{\text{ном}}$	0,04	0,03	0,035	0,03	0,035

2. Приведенное значение тока в цепи ротора при номинальной нагрузке

$$I'_2 = \frac{U_1}{\sqrt{(r_1 + r'_2/s_{ном})^2 + (x_1 - x'_2)^2}} = \frac{220}{\sqrt{(0,21 + 0,08/0,04)^2 + (0,20 + 0,16)^2}} = 98 \text{ A.}$$

3. При числе полюсов $2p = 8$, частоте тока 50 Гц и номинальном скольжении $s_{ном} = 0,04$ номинальная частота вращения

$$n_{ном} = 750(1 - 0,04) = 720 \text{ об/мин.}$$

4. Электромагнитный момент двигателя в номинальном режиме

$$M_{ном} = \frac{m_1 I_2'^2 r'_2}{2\pi f_s [(r_1 + r'_2/s_{ном})^2 + (x_1 + x'_2)^2]} = \frac{3 \cdot 220^2 \cdot 0,08 \cdot 4}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 0,04 [(0,21 + 0,08/0,04)^2 + (0,20 + 0,16)^2]} = 738 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

5. Максимальный момент двигателя

$$M_{max} = \frac{m_1 I_2'^2 r'_2}{4\pi f_s \left| \pm r_1 + \sqrt{r_1^2 + (x_1 + x'_2)^2} \right|} = \frac{3 \cdot 220^2 \cdot 4}{4 \cdot 3,14 \cdot 50 \left| 0,21 + \sqrt{0,21^2 + (0,20 + 0,16)^2} \right|} = 1476 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

6. Перегрузочная способность двигателя

$$\lambda_m = 1476/738 = 2.$$

7. Электромагнитная мощность при номинальной нагрузке двигателя

$$P_{эм} = 0,105 M_{ном} n_1 = 0,105 \cdot 738 \cdot 750 = 58\,117 \text{ Вт.}$$

8. Мощность электрических потерь в обмотке ротора при номинальной нагрузке

$$P_{\Sigma 2} = m_1 I_2'^2 r'_2 = 3 \cdot 98^2 \cdot 0,08 = 2304 \text{ Вт.}$$

9. Добавочные потери при номинальной нагрузке

$$P_{доб} \approx 0,005 P_{эм} = 0,005 \cdot 58\,117 = 290 \text{ Вт.}$$

10. Механические потери

$$P_{мех} = 2P_{доб} = 2 \cdot 290 = 580 \text{ Вт.}$$

11. Полезная мощность в номинальном режиме двигателя

$$P_{\text{ном}} = P_{\text{эм}} - P_{\text{з2}} - P_{\text{доб}} - P_{\text{мех}} = 58\,117 - 2304 - 290 - 580 = \\ = 54\,943 \text{ Вт, т. е. } P_{\text{ном}} \approx 55 \text{ кВт.}$$

Задача 3.11. Трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором работает от сети переменного тока напряжением $U_{\text{л}} = 380 \text{ В}$ частотой $f_1 = 50 \text{ Гц}$. При номинальной нагрузке ротор двигателя вращается с частотой $n_{\text{ном}}$; перегрузочная способность двигателя $\lambda_{\text{м}}$, а кратность пускового момента $M_{\text{п}}/M_{\text{ном}}$ (табл. 3.12). Рассчитать значения параметров и построить механическую характеристику двигателя в относительных единицах $M_* = f(s)$, если электромагнитная мощность в режиме номинальной нагрузки равна $P_{\text{эм}}$. Определить, при каком снижении напряжения относительно номинального двигатель утратит способность пуска с номинальным моментом на валу и при каком снижении напряжения он утратит перегрузочную способность.

Таблица 3.12

Параметр	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$P_{\text{эм}}$, кВт	7,5	15	11	4,0	15	1,1	30	3,0	7,5	37
$n_{\text{ном}}$, об/мин	1440	2940	960	1420	720	2920	580	1430	730	575
$\lambda_{\text{м}}$	2,2	1,9	2,0	2,2	2,0	1,9	1,8	2,2	1,7	1,8
$M_{\text{п}}/M_{\text{ном}}$	1,4	1,4	1,2	1,0	1,0	1,2	1,4	1,0	0,9	1,0
$2p$	4	2	6	4	8	2	10	4	8	10

Решение варианта 1.

Расчет ведем в относительных единицах по упрощенной формуле

$$M_* = 2 / [(s/s_{\text{кр}}) + (s_{\text{кр}}/s)],$$

где $M_* = M/M_{\text{макс}}$ — относительное значение электромагнитного момента.

1. Номинальное скольжение

$$s_{\text{ном}} = (n_1 - n_{\text{ном}})/n_1 = (1500 - 1440)/1500 = 0,04.$$

2. Критическое скольжение

$$s_{\text{кр}} = s_{\text{ном}} (\lambda_{\text{м}} + \sqrt{\lambda_{\text{м}}^2 - 1}) = 0,04 (2,2 + \sqrt{2,2^2 - 1}) = 0,17.$$

3. Рассчитаем относительные значения момента при скольжениях:

$$s_{\text{ном}} = 0,04; s_{\text{кр}} = 0,17; s = 0,2; s = 0,5; s = 0,8.$$

Параметр	Значения параметра					
s	0,04	0,17	0,2	0,5	0,8	1,0
M_*	0,445	1,0	0,98	0,61	0,4	0,64
$M, \text{ Н} \cdot \text{ м}$	47,7	105	103	64	42	66,8

Результаты расчета приведены в табл. 3.13. По полученным данным рассчитаны фактические значения момента и построена механическая характеристика $M_* = f(s)$ двигателя (рис. 3.8). В связи с тем, что приближенная формула относительного значения момента при больших скольжениях дает заметную ошибку, величину пускового момента, соответствующую скольжению $s = 1,0$, определим по номинальному значению момента

$$M_{\text{ном}} = 9,55 P_{\text{эм}} / n_1 = 9,55 \cdot 7500 / 1500 = 47,7 \text{ Н} \cdot \text{ м}.$$

Следовательно,

$$M_{\text{п}} = M_{\text{ном}} \cdot 1,4 = 47,7 \cdot 1,4 = 66,8 \text{ Н} \cdot \text{ м}.$$

Относительное значение пускового момента

$$M_{\text{п}*} = M_{\text{п}} / M_{\text{мах}} = 66,8 / 105 = 0,63,$$

где максимальное значение момента

$$M_{\text{мах}} = M_{\text{ном}} \lambda_{\text{м}} = 47,7 \cdot 2,2 = 105 \text{ Н} \cdot \text{ м}.$$

4. Известно, что величина электромагнитного момента прямо пропорциональна U_1^2 . Поэтому при кратности пускового момента $M_{\text{п}} / M_{\text{ном}} = 1,4$ пусковой момент окажется равным номинальному, если напряжение питания уменьшится до значения

$$U'_{1\text{п}} = U_{1\text{п}} / \sqrt{1,4} = 380 / 1,18 = 322 \text{ В}.$$

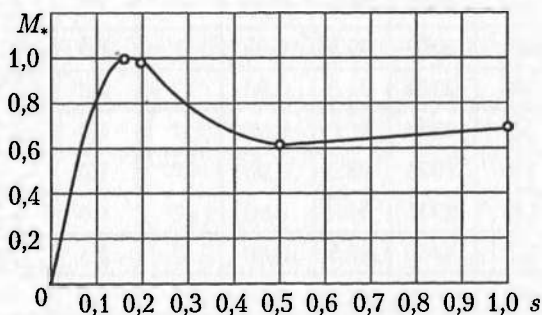


Рис. 3.8. Механическая характеристика асинхронного двигателя

В итоге даже незначительное дальнейшее снижение напряжения приведет к тому, что при номинальном нагрузочном моменте на валу двигателя пуск не произойдет. Что же касается перегрузочной способности двигателя, то, учитывая, что $\lambda_m = 2,2$, она будет утрачена при уменьшении напряжения сети до величины

$$U_{1л} / \sqrt{2,2} = 380 / 1,48 = 257 \text{ В.}$$

Задача 3.12. Трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором серии А2, работающий от сети частотой 50 Гц напряжением 380 В при соединении обмотки статора «звездой», имеет номинальные параметры, приведенные в табл. 3.14: полезная мощность $P_{ном}$, частота вращения $n_{ном}$, КПД $\eta_{ном}$, коэффициент мощности $\cos \varphi_{1ном}$; кратность пускового тока $I_{п} / I_{ном}$, кратности пускового $M_{п} / M_{ном}$ и максимального $M_{max} / M_{ном}$ моментов; активное сопротивление фазной обмотки статора при температуре 20 °С r_{120} . Требуется рассчитать параметры и построить механическую характеристику двигателя $n_2 = f(M)$. Коэффициент мощности в режиме короткого замыкания принять равным

$$\cos \varphi_k = 0,5 \cos \varphi_{1ном}.$$

Решение варианта с двигателем А2-71-4.

1. Потребляемая двигателем мощность в режиме номинальной нагрузки

$$P_{1ном} = P_{ном} / \eta_{ном} = 22 / 0,9 = 24,4 \text{ кВт.}$$

Таблица 3.14

Тип двигателя	$P_{ном}$, кВт	$n_{ном}$, об/мин	$\eta_{ном}$, %	$\cos \varphi_{1ном}$	$I_{п} / I_{ном}$	$M_{п} / M_{ном}$	$M_{max} / M_{ном}$	$r_{1,20}$, Ом при 20 °С
А2-61-2	17	2900	88,0	0,88	7	1,2	2,2	0,1900
А2-62-2	22	2900	89,0	0,88	7	1,1	2,2	0,1540
А2-71-2	30	2900	90,0	0,90	7	1,1	2,2	0,1170
А2-72-2	40	2900	90,5	0,90	7	1,0	2,2	0,0770
А2-81-2	55	2900	91,0	0,90	7	1,0	2,2	0,0540
А2-82-2	75	2900	92,0	0,90	7	1,0	2,2	0,0347
А2-91-2	100	2920	93,0	0,90	7	1,0	2,2	0,0209
А2-92-2	125	2920	94,0	0,90	7	1,0	2,2	0,0144
А2-61-4	13	1450	88,5	0,88	7	1,3	2,0	0,2700
А2-62-4	17	1450	89,5	0,88	7	1,3	2,0	0,1890
А2-71-4	22	1455	90,0	0,88	7	1,2	2,0	0,1700

2. Потребляемый двигателем ток в режиме номинальной нагрузки

$$I_{1\text{ном}} = P_{1\text{ном}} / (3 U_1 \cos \varphi_{1\text{ном}}) = 24\,400 / (3 \cdot 220 \cdot 0,88) = 42 \text{ A.}$$

3. Пусковой ток двигателя

$$I_{\text{п}} = I_{1\text{ном}} (I_{\text{п}} / I_{1\text{ном}}) = 42 \cdot 7 = 294 \text{ A.}$$

4. Сопротивление короткого замыкания двигателя

$$Z_{\text{к}} = U_1 / I_{\text{п}} = 220 / 294 = 0,75 \text{ Ом.}$$

5. Коэффициент мощности в режиме короткого замыкания

$$\cos \varphi_{\text{к}} = 0,5 \cdot 0,88 = 0,44; \sin \varphi_{\text{к}} = 0,895.$$

6. Активная и индуктивная составляющие сопротивления короткого замыкания

$$x_{\text{к}} = Z_{\text{к}} \sin \varphi_{\text{к}} = 0,75 \cdot 0,895 = 0,67 \text{ Ом;}$$

$$r_{\text{к}} = Z_{\text{к}} \cos \varphi_{\text{к}} = 0,75 \cdot 0,44 = 0,33 \text{ Ом.}$$

7. Сопротивление фазной обмотки статора при рабочей температуре

$$r_1 = r_{1,20} [1 + \alpha (\theta_{\text{раб}} - 20)] = 0,17 [1 + 0,004 (75 - 20)] = 0,21 \text{ Ом,}$$

где $\theta_{\text{раб}} = 75^\circ \text{C}$ — рабочая температура; $\alpha = 0,004$ — температурный коэффициент сопротивления меди.

8. Скольжение в режиме номинальной нагрузки

$$s_{\text{ном}} = (n_1 - n_{\text{ном}}) / n_{\text{ном}} = (1500 - 1455) / 1500 = 0,03.$$

9. Приведенное значение активного сопротивления фазы обмотки ротора

$$r_2' = r_{\text{к}} - r_1 = 0,33 - 0,21 = 0,12 \text{ Ом.}$$

10. Номинальное значение электромагнитного момента определяем по формуле

$$M = \frac{3 \cdot 220^2 \cdot 0,03 \cdot 2}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 0,03 [(0,21 + 0,12 / 0,03)^2 + 0,67^2]} = 204 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

11. Максимальный момент

$$M_{\text{max}} = 204 \cdot 2 = 408 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

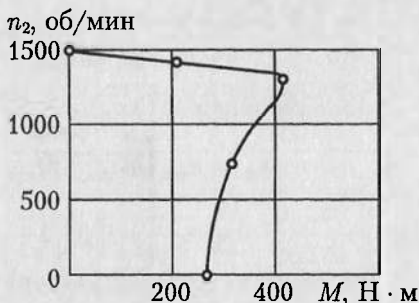


Рис. 3.9. Механическая характеристика асинхронного двигателя

12. Пусковой момент

$$M_{\Pi} = 204 \cdot 1,2 = 245 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

13. Критическое скольжение

$$s_{\text{кр}} = s_{\text{ном}} \left[M_{\text{max}} / M_{\text{ном}} + \sqrt{(M_{\text{max}} / M_{\text{ном}})^2 - 1} \right] =$$

$$= 0,03 \left[2 + \sqrt{2^2 - 1} \right] = 0,11.$$

14. Момент при скольжении $s = 0,5$

$$M = \frac{m_1 U_1^2 r_2' p}{2\pi f_p \left[(x_1 + x_2'/s)^2 + (x_1 + x_2')^2 \right]} =$$

$$= \frac{3 \cdot 220^2 \cdot 0,12 \cdot 2}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 0,5 \left[(0,21 + 0,12/0,5)^2 + 0,69^2 \right]} = 341 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

15. Рассчитав частоту вращения по формуле

$$n_2 = n_1(1 - s),$$

получаем результаты расчета параметров для построения механической характеристики двигателя:

Скольжение	0	0,03	0,11	0,5	1,0
Частота вращения, об/мин	1500	1455	1335	750	0
Момент, Н · м	0	204	410	341	245

16. По полученным данным строим механическую характеристику $n_2 = f(M)$, представленную на рис. 3.9.

Задача 3.13. В табл. 3.15 приведены технические данные трехфазных асинхронных двигателей с фазным ротором серии АК2. Требуется определить номинальное $M_{\text{ном}}$ и максимальное M_{max} значения моментов, номинальное $s_{\text{ном}}$ и критическое $s_{\text{кр}}$ скольжения, а также сопротивление резистора, который следует включить в цепь фазной обмотки ротора, чтобы начальный пусковой момент двигателя был равен максимальному; построить механическую характеристику для этого режима и по ней определить скольжение, соответствующее номинальному моменту $M_{\text{ном}}$. Напряжение сети 380 В, частота 50 Гц; обмотка статора соединена «звездой». Кратность пускового тока при прямом (безреостатном) включении двигателя в сеть $I_{\Pi} / I_{\text{ном}} = 7$; коэффициент мощности в режиме короткого замыкания принять равным

$$\cos \varphi_{\text{к}} = 0,5 \cos \varphi_{\text{ном}}.$$

Решение варианта с двигателем АК2-82-8.

Тип двигателя	$P_{\text{ном}}$, кВт	$n_{\text{ном}}$, об/мин	$\cos \varphi_{\text{ном}}$	$M_{\text{ном}}$	$r_{1,20}$, Ом, при 20 °С
AK2-81-4	40	1440	90,0	2,0	0,0725
AK2-82-4	55	1440	90,5	2,0	0,0390
AK2-91-4	75	1450	90,5	2,0	0,0326
AK2-92-4	100	1450	90,5	2,0	0,0210
AK2-81-6	30	960	89,0	1,8	0,0920
AK2-82-6	40	960	89,0	1,8	0,0605
AK2-91-6	55	960	89,0	1,8	0,0590
AK2-92-6	75	960	90,5	1,8	0,0350
AK2-81-8	22	720	87,5	1,7	0,1570
AK2-82-8	30	720	87,5	1,7	0,0935

1. Потребляемая двигателем мощность в номинальном режиме

$$P_{\text{I ном}} = P_{\text{ном}} / \eta_{\text{ном}} = 30 / 0,875 = 34,3 \text{ кВт.}$$

2. Ток, потребляемый двигателем в номинальном режиме,

$$I_{\text{I ном}} = P_{\text{I ном}} / (3 U_1 \cos \varphi_{\text{ном}}) = 34\,300 / (3 \cdot 220 \cdot 0,79) = 66 \text{ А.}$$

3. Скольжение в номинальном режиме

$$s_{\text{ном}} = (750 - 720) / 750 = 0,04.$$

4. Активное сопротивление фазы статора при рабочей температуре 75 °С

$$\begin{aligned} r_1 &= r_{1,20} [1 + \alpha(75 - 20)] = 0,0935 [1 + 0,004 \cdot 55] = \\ &= 0,0935 \cdot 1,22 = 0,114 \text{ Ом.} \end{aligned}$$

5. Пусковой ток при прямом (безреостатном) включении

$$I_{\text{п}} = I_{\text{I ном}} (I_{\text{п}} / I_{\text{I ном}}) = 66 \cdot 7 = 462 \text{ А.}$$

6. Сопротивление короткого замыкания

$$Z_{\text{к}} = U_1 / I_{\text{п}} = 220 / 462 = 0,48 \text{ Ом.}$$

7. Коэффициент мощности короткого замыкания

$$\cos \varphi_{\text{к}} = 0,5 \cos \varphi_{\text{I ном}} = 0,5 \cdot 0,79 = 0,395; \sin \varphi_{\text{к}} = 0,918.$$

8. Индуктивная составляющая сопротивления короткого замыкания

$$x_{\text{к}} = Z_{\text{к}} \sin \varphi_{\text{к}} = 0,48 \cdot 0,918 = 0,44 \text{ Ом.}$$

9. Активная составляющая сопротивления короткого замыкания

$$r_k = Z_k \cos \varphi_k = 0,48 \cdot 0,395 = 0,19 \text{ Ом.}$$

10. Активное сопротивление фазы ротора, приведенное к фазе статора,

$$r'_2 = r_k - r_1 = 0,19 - 0,114 = 0,076 \text{ Ом.}$$

11. Активное сопротивление фазы ротора при скольжении $s_{\text{ном}} = 0,04$

$$r'_2 / s_{\text{ном}} = 0,076 / 0,04 = 1,9 \text{ Ом.}$$

12. Номинальное значение электромагнитного момента

$$M_{\text{н}} = \frac{3 \cdot 220^2 \cdot 0,076 \cdot 4}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 0,04 [(0,114 + 1,9)^2 + 0,44^2]} = 720 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

13. Максимальное значение момента

$$M_{\text{max}} = \frac{3 \cdot 220^2 \cdot 4}{4 \cdot 3,14 \cdot 50 [0,114 + \sqrt{0,114^2 + 0,44^2}]} = 1640 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

14. Критическое скольжение

$$s_{\text{кр}} \approx \pm r'_2 / x_k = 0,076 / 0,44 = 0,17.$$

15. Сопротивление резистора $r_{\text{доб}}$, при включении которого в цепь ротора пусковой момент становится максимальным, должно быть таким, чтобы общее активное сопротивление фазы ротора было равно сопротивлению x_k . Следовательно,

$$r_{\text{доб}} = x_k - r'_2 = 0,44 - 0,076 = 0,364 \text{ Ом.}$$

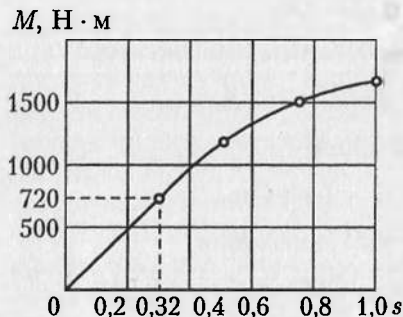


Рис. 3.10. Искусственная механическая характеристика асинхронного двигателя $M = f(s)$

16. Для построения искусственной механической характеристики $M = f(s)$, соответствующей приведенному значению сопротивления цепи ротора $r_{\text{доб}} + r'_2 = 0,44 \text{ Ом}$, рассчитаем значения моментов при скольжениях $s = 0,5$ и $s = 0,75$.

Результаты расчета электромагнитного момента для ряда значений скольжения представлены ниже:

s	0	0,5	0,75	1,0
$M, \text{ Н} \cdot \text{ м}$	0	1381	1500	1640

Из построений на рис. 3.10 следует, что при номинальном моменте $M_{\text{ном}} = 720 \text{ Н} \cdot \text{ м}$ скольжение составляет $s = 0,32$, что соответствует частоте вращения $n_{\text{ном}} = 750(1 - 0,32) = 510 \text{ об/мин}$.

Задача 3.14. Трехфазный асинхронный двигатель номинальной мощностью $P_{\text{ном}}$ включен в сеть напряжением 380 В, частотой 50 Гц, обмотка статора соединена «звездой». Вращаясь с частотой $n_{\text{ном}}$, двигатель потребляет ток $I_{\text{ном}}$ при коэффициенте мощности $\cos \varphi_1$. При работе в режиме холостого хода двигатель потребляет из сети мощность P_{10} при токе I_{10} ; активное сопротивление фазной обмотки статора при рабочей температуре r_1 (табл. 3.16). Определить все виды потерь двигателя в режиме номинальной нагрузки, приняв величину механических потерь $P_{\text{мех}}$.

Таблица 3.16

Параметр	Варианты					
	1	2	3	4	5	6
$P_{\text{ном}}, \text{ кВт}$	15	7,0	75	100	7,0	10
$I_{\text{ном}}, \text{ А}$	32	14	140	180	11	19
$n_{\text{ном}}, \text{ об/мин}$	1455	2910	960	1460	1450	2920
$r_1, \text{ Ом}$	0,25	0,58	0,036	0,015	0,52	0,33
$\cos \varphi_1$	0,85	0,90	0,88	0,91	0,86	0,91
$P_{10}, \text{ Вт}$	820	400	1270	2000	300	330
$I_{10}, \text{ А}$	7,0	4,0	31	43	4,5	5,0
$P_{\text{мех}}, \text{ Вт}$	160	170	250	450	120	220

Решение варианта 1.

1. Электрические потери в обмотке статора в режиме холостого хода

$$P_{\text{э}10} = m_1 I_{10}^2 r_1 = 3 \cdot 7^2 \cdot 0,25 = 37 \text{ Вт.}$$

2. Постоянные потери (сумма магнитных и механических потерь)

$$P_{\text{пост}} = P_{10} - P_{\text{э}10} = 820 - 37 = 783 \text{ Вт.}$$

3. Магнитные потери

$$P_{\text{м}} = P_{\text{пост}} - P_{\text{мех}} = 783 - 160 = 623 \text{ Вт.}$$

4. Мощность, потребляемая из сети при номинальной нагрузке,

$$P_{\text{ном}} = m_1 U I_{\text{ном}} \cos \varphi_1 = 3 \cdot 220 \cdot 32 \cdot 0,85 = 17\,952 \text{ Вт.}$$

5. Суммарные потери

$$\sum P = P_{\text{ном}} - P_{\text{ном}} - 17\,952 - 15\,000 = 2952 \text{ Вт.}$$

6. КПД двигателя в номинальном режиме

$$\eta_{\text{ном}} = P_{\text{ном}} / P_{\text{ном}} = 15 / 17,95 = 0,83.$$

7. Переменные потери (сумма электрических потерь в обмотках статора и ротора и добавочных потерь) в номинальном режиме

$$P_{\text{пер.ном}} = \sum P - P_{\text{пост}} = 2952 - 783 = 2169 \text{ Вт.}$$

8. Добавочные потери в номинальном режиме

$$P_{\text{доб.ном}} = 0,005 P_{\text{ном}} = 0,005 \cdot 17\,952 = 90 \text{ Вт.}$$

9. Электрические потери в обмотке статора в номинальном режиме

$$P_{\text{элном}} = m_1 I_{\text{ном}}^2 r_1 = 3 \cdot 32^2 \cdot 0,25 = 768 \text{ Вт.}$$

10. Электрические потери в обмотке ротора в номинальном режиме

$$P_{\text{э2ном}} = P_{\text{пер.ном}} - P_{\text{элном}} - P_{\text{доб.ном}} = 2169 - 768 - 90 = 1311 \text{ Вт.}$$

Круговая диаграмма и рабочие характеристики

Задача 3.15. По рабочим характеристикам трехфазных асинхронных двигателей, приведенным в Приложении 2, и данным табл. 3.17 по каждому из предлагаемых вариантов требуется определить:

а) параметры двигателя в номинальном режиме работы — ток статора $I_{\text{ном}}$, КПД $\eta_{\text{ном}}$, коэффициент мощности $\cos \varphi_{\text{ном}}$, скольжение $s_{\text{ном}}$, частоту вращения $n_{\text{ном}}$, потребляемую мощность $P_{\text{ном}}$;

б) максимальное значение КПД η_{max} и соответствующие этому КПД нагрузку P_2 , выразив ее в долях от номинальной $P_{\text{ном}}$;

Таблица 3.17

Парамстр	Варианты					
	1	2	3	4	5	6
Рисунок (см. приложение 2)	П. 2.1	П. 2.2	П. 2.3	П. 2.4	П. 2.5	П. 2.6
$P_{\text{ном}}$, кВт	250	2,8	7,5	160	4,0	45
Напряжение сети $U_{\text{лн}}$, В	660	220	380	380	220	380
Схема соединения обмотки статора	Y	Δ	Y	Δ	Δ	Y
$2p$	4	4	4	4	4	4

в) отношение переменных потерь $P_{\text{пер. ном}}$ к постоянным потерям $P_{\text{пост}}$ при номинальной нагрузке;

г) активное сопротивление фазы обмотки статора r_1 .

Решение варианта 1.

1. Параметры двигателя при номинальном режиме (см. рис. П. 2.1):

полезная мощность двигателя $P_{\text{ном}} = 250$ кВт;

ток статора $I_{\text{ном}} = 250$ А;

скольжение $s_{\text{ном}} = 1,7\%$ или 0,017;

частота вращения $n_{\text{ном}} = 1500(1 - 0,017) = 1474$ об/мин;

коэффициент полезного действия $\eta_{\text{ном}} = 0,92$;

коэффициент мощности $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,88$;

потребляемая мощность $P_{\text{ном}} = P_{\text{ном}} / \eta_{\text{ном}} = 250 / 0,92 = 271,7$ кВт.

2. Максимальное значение КПД $\eta_{\text{max}} = 0,94$ соответствует нагрузке

$$P_2 = 150 \text{ кВт, т. е. } 0,6P_{\text{ном}} \text{ (см. рис. П.2.1).}$$

3. Потребляемая двигателем мощность при нагрузке $0,6P_{\text{ном}} = 150$ кВт

$$P_1 = P_2 / \eta_{\text{max}} = 150 / 0,94 = 159,6 \text{ кВт.}$$

4. Сумма потерь при нагрузке $P_2 = 0,6P_{\text{ном}} = 150$ кВт,

$$\Sigma P = P_1 - P_2 = 159,6 - 150 = 9,6 \text{ кВт.}$$

5. Постоянные потери

$$P_{\text{пост}} = P_{\text{м}} + P_{\text{мех}} = \Sigma P / 2 = 9,6 / 2 = 4,8 \text{ кВт.}$$

6. Суммарные потери двигателя при номинальной нагрузке

$$\Sigma P_{\text{ном}} = P_{\text{ном}} - P_{\text{ном}} = 271,7 - 250 = 21,7 \text{ кВт.}$$

7. Переменные потери в режиме номинальной нагрузки

$$P_{\text{пер. ном}} = \Sigma P_{\text{ном}} - P_{\text{пост}} = 21\,700 - 4800 = 16\,900 \text{ Вт.}$$

8. Отношение переменных потерь к постоянным при номинальной нагрузке

$$P_{\text{пер. ном}} / P_{\text{пост}} = 16\,900 / 4800 \approx 3,5.$$

9. Добавочные потери при номинальной нагрузке

$$P_{\text{доб}} = 0,005P_{\text{ном}} = 0,005 \cdot 271\,700 = 1359 \text{ Вт.}$$

10. Момент холостого хода

$$M_0 = 9,55P_{\text{пост}} / n_1 = 9,55 \cdot 4800 / 1500 = 31 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

11. Номинальный момент на валу двигателя

$$M_{2\text{ном}} = 9,55P_{\text{ном}} / n_{\text{ном}} = 9,55 \cdot 250\,000 / 1474 = 1620 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

12. Электромагнитный момент в номинальном режиме

$$M_{\text{ном}} = M_{2\text{ном}} + M_0 = 1620 + 31 = 1651 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

13. Электромагнитная мощность в номинальном режиме

$$P_{\text{эм.ном}} = 0,105 M_{\text{ном}} n_1 = 0,105 \cdot 1651 \cdot 1500 = 260\,032 \text{ Вт.}$$

14. Электрические потери в обмотке ротора в режиме номинальной нагрузки

$$P_{\text{э2ном}} = s_{\text{ном}} P_{\text{эм.ном}} = 0,017 \cdot 260\,032 = 4420 \text{ Вт.}$$

15. Электрические потери в обмотке статора в режиме номинальной нагрузки

$$P_{\text{э1ном}} = P_{\text{пер.ном}} - P_{\text{э2ном}} - P_{\text{доб}} = 16\,900 - 4420 - 1359 = 11\,121 \text{ Вт.}$$

16. Активное сопротивление фазы обмотки статора

$$r_1 = P_{\text{э1ном}} / (m_1 I_{1\text{ном}}^2) = 11\,121 / (3 \cdot 250^2) = 0,059 \text{ Ом.}$$

Задача 3.16. Построить упрощенную круговую диаграмму трехфазного асинхронного двигателя и определить параметры, соответствующие его номинальному режиму работы. Необходимые для построения диаграммы данные приведены в табл. 3.18: номинальная мощность $P_{\text{ном}}$; напряжение на обмотке статора (фазное) $U_{1\text{ф}}$; номинальный ток статора (фазный) $I_{1\text{ф}}$; число полюсов $2p$; активное сопротивление фазной обмотки статора при рабочей температуре r_1 ; ток

Таблица 3.18

Параметр	Варианты					
	1	2	3	4	5	6
$P_{\text{ном}}$, кВт	3,0	12	70	22	250	16
$U_{1\text{ф}}$, В	220	220	220	220	1730	220
$I_{1\text{ф}}$, А	6,3	25	190	54	60	40
$2p$	4	4	4	8	6	8
r_1 , Ом	1,7	0,32	0,035	0,15	0,68	0,15
$I_{0\text{ф}}$, А	1,83	9,7	55	32,8	17,5	9,6
P_0 , Вт	300	565	6500	1340	10 750	950
P'_0 , Вт	283	475	6180	1120	10 125	890
$P_{\text{мех}}$, Вт	200	250	600	370	1350	270
$\cos \varphi_0$	0,24	0,10	0,20	0,064	0,12	0,15
$P_{\text{к}}$, Вт	418	1780	9500	2360	12 160	1740
$U_{\text{к.ф}}$, В	59,5	57,8	58,0	44,0	360	42,0
$\cos \varphi_{\text{к}}$	0,37	0,34	0,30	0,33	0,25	0,34

холостого хода (фазный) $I_{0ф}$; мощность холостого хода P_0 ; мощность идеального холостого хода $P_0 = P_0 - 3I_0r_1$; механические потери $P_{мех}$; коэффициент мощности холостого хода $\cos \varphi_0$; мощность короткого замыкания P_k ; напряжение короткого замыкания (фазное) U_k ; коэффициент мощности короткого замыкания $\cos \varphi_k$; частота тока 50 Гц.

Решение варианта 1.

1. Углы фазового сдвига токов холостого хода $I_{0ф}$ и короткого замыкания $I_{1к}$ относительно напряжения $U_{1ф}$ (рис. 3.11):

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

$$\varphi_k = \arccos 0,37 = 68^\circ.$$

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

$$I_{1к} = I_{1ф}(U_{1ф}/U_{к.ф}) = 6,3(220/59,5) = 23 \text{ А.}$$

3. Принимаем масштаб тока исходя из размеров листа бумаги, на котором предполагается построение диаграммы; например, если применяется лист форматом А4 (210 × 297 мм), то масштаб тока $m_i = 0,1 \text{ А/мм.}$

4. Длина векторов тока:
тока холостого хода

$$\overline{OH} = I_{0ф} / m_i = 1,83 / 0,1 = 18,3 \text{ мм;}$$

номинального тока статора

$$\overline{OD_1} = I_{1ф} / m_i = 6,3 / 0,1 = 63 \text{ мм;}$$

тока короткого замыкания

$$\overline{OK} = I_{1к} / m_i = 23 / 0,1 = 230 \text{ мм.}$$

5. Масштабы мощности и момента

$$m_p = m_1 U_{1ф} m_i = 3 \cdot 220 \cdot 0,1 = 66 \text{ Вт/мм;}$$

$$m_m = 9,55 m_p / n_1 = 9,55 \cdot 66 / 1500 = 0,42 \text{ Н} \cdot \text{м/мм.}$$

6. На оси ординат из точки O строим вектор напряжения $U_{1ф}$ произвольной длины и под углом φ_0 к оси ординат строим вектор тока холостого хода $\overline{OH} = 18,3 \text{ мм}$ и под углом φ_k строим вектор тока короткого замыкания $\overline{OK} = 230 \text{ мм.}$

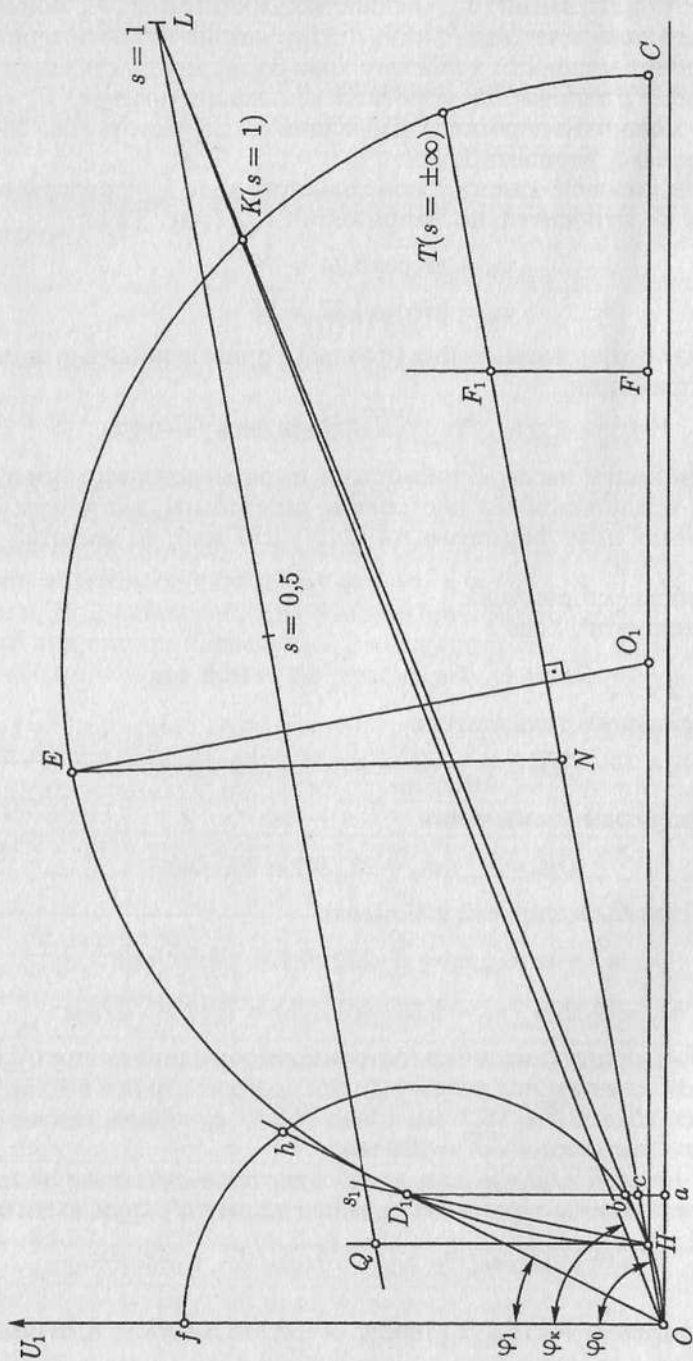
7. Из точки H параллельно оси абсцисс проводим прямую, на которой откладываем отрезок $\overline{HC}$, равный диаметру окружности токов

$$D_i = (U_{1ф}/x_k)/m_i = (220/8,78)/0,1 = 250 \text{ мм,}$$

где

$$r_k = z_k \sin \varphi_k = (U_{к.ф}/I_{1ф}) \sin \varphi_k = (59,5/6,3) 0,93 = 8,78 \text{ Ом.}$$

Здесь $\sin \varphi_k = 0,93$.



8. Из точки O_1 , лежащей посередине диаметра окружности, радиусом $HC/2$ проводим полуокружность токов. При этом точки H и K оказываются на этой полуокружности. Соединяем точки H и K и получаем *линию полезной мощности* HK .

9. На окружности токов отмечаем точку D_1 (точка номинального режима нагрузки двигателя). Для этого из точки O откладываем отрезок $OD_1 = 63$ мм.

10. На средней части отрезка O_1C отмечаем точку F , в которой восстанавливаем перпендикуляр к диаметру HC . На этом перпендикуляре отмечаем отрезок

$$FF_1 = HF(r_1 / x_k) = 180(1,7 / 8,78) = 35 \text{ мм.}$$

11. Из точки H через точку F_1 проводим прямую до пересечения с окружностью токов в точке T , соответствующей скольжению $s = \pm \infty$. Полученная линия HT является *линией электромагнитной мощности (момента)*.

12. Из точки O_1 опускаем перпендикуляр на линию HT и продолжаем его до пересечения с окружностью токов в точке E . Полученная таким образом точка E соответствует максимальному моменту, так как отрезок EN в масштабе моментов представляет собой максимальный момент двигателя, а отношение отрезков

$$\overline{EN} / \overline{D_1c} = M_{\max} / M_{\text{ном}}$$

— перегрузочную способность двигателя.

13. Точка D_1 на окружности токов соответствует режиму номинальной нагрузки двигателя. Прямоугольный треугольник OD_1a представляет собой треугольник токов: сторона OD_1 — номинальный ток статора (см. п. 4), сторона D_1a — активная составляющая тока статора, сторона Oa — реактивная (индуктивная) составляющая тока статора.

14. Для определения коэффициента мощности двигателя $\cos \varphi_1$ делаем дополнительные построения: на оси ординат радиусом 50 мм проводим полуокружность, а линию OD_1 продолжаем до пересечения с этой полуокружностью в точке h . Отношение отрезка $Oh = 88$ мм к диаметру полуокружности определяет значение коэффициента мощности в режиме номинальной нагрузки:

$$\cos \varphi_1 = Oh / 100 = 88 / 100 = 0,88.$$

15. Для определения скольжения и частоты вращения ротора двигателя также необходимы дополнительные построения: из точки H параллельно оси ординат проводим линию HQ , затем из точки Q параллельно линии электромагнитной мощности HT проводим линию до пересечения с продолжением линии полезной мощности HK в точке L . Полученная таким образом линия QL представляет собой *шкалу скольжения*: в точке холостого хода H скольжение $s = 0$, а в точке короткого замыкания K скольжение $s = 1$. Продолжив

отрезок $\overline{HD_1}$ до пересечения со шкалой скольжения, получим на шкале скольжения точку s_1 , которая определит скольжение двигателя в режиме номинальной нагрузки $s_1 = 0,045$. Частота вращения при этом равна

$$n_{\text{ном}} = 1500(1 - 0,045) = 1430 \text{ об/мин.}$$

16. Номинальная мощность двигателя (проверка)

$$P_{\text{ном}} = \overline{D_1 b} m_p = 46 \cdot 66 \cdot 10^{-3} = 3,0 \text{ кВт.}$$

17. Потребляемая в номинальном режиме мощность

$$P_{\text{ном}} = \overline{D_1 a} m_p = 55 \cdot 66 \cdot 10^{-3} = 3,6 \text{ кВт.}$$

18. КПД двигателя в номинальном режиме

$$\eta_{\text{ном}} = \overline{D_1 b} / \overline{D_1 a} = 46/55 = 0,84.$$

19. Электромагнитный момент в номинальном режиме

$$M_{\text{ном}} = \overline{D_1 c} m_m = 51 \cdot 0,42 = 21,4 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Задача 3.17. Используя значения параметров трехфазных асинхронных двигателей, приведенные в задаче 3.16 (см. табл. 3.18), рассчитать параметры и построить рабочие характеристики асинхронного двигателя: I_1 , M_2 , n_2 , $\cos \varphi_1$, $\eta = f(P_2)$. При этом можно воспользоваться либо упрощенной круговой диаграммой, построенной при решении задачи 3.16, либо применить аналитический метод расчета рабочих характеристик.

Решение варианта 1 аналитическим методом.

1. Активная и реактивная составляющие тока холостого хода:

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

$$I_{0p} = I_{0\phi} \sin \varphi_0 = 1,83 \cdot 0,93 = 1,70 \text{ А.}$$

2. Сопротивление короткого замыкания

$$z_k = U_{\text{к.ф}} / I_{1\phi} = 59,5/6,3 = 9,45 \text{ Ом.}$$

3. Активная и реактивная составляющие сопротивлений короткого замыкания

$$r_k = z_k \cos \varphi_k = 9,45 \cdot 0,37 = 3,5 \text{ Ом;}$$

$$x_k = z_k \sin \varphi_k = 9,45 \cdot 0,93 = 8,78 \text{ Ом.}$$

4. Приведенное значение активного сопротивления обмотки ротора

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

5. Критическое скольжение

$$s_{\text{кр}} \approx r_2' / x_k = 1,8 / 8,78 = 0,20.$$

6. Номинальное скольжение (по данным задачи 3.16) $s_{\text{ном}} = 0,045$.

7. Магнитные потери

$$P_m = P_0' - P_{\text{мех}} = 283 - 200 = 83 \text{ Вт.}$$

Для расчета последующих параметров задаемся рядом значений скольжения $s = 0,01; 0,02; 0,03; 0,045; 0,06$ и для каждого из них

Таблица 3.19

Расчетные формулы	Значения параметра при скольжении s , равном				
	0,01	0,02	0,03	0,045	0,06
$r_2' / s = 1,8 / s$, Ом	180	90	60	39,1	30
$r_k = r_1 + r_2 / s$, Ом	181,7	91,7	61,7	40,8	31,7
$z_k = \sqrt{r_k^2 + x_k^2}$, Ом	182	92	62,5	42	33,2
$\cos \varphi_2 = r_k / z_k$	0,998	0,996	0,987	0,971	0,955
$I_2' = U_1 / z_k$, А	1,21	2,38	3,52	5,24	6,63
$I_{2a}' = I_2' \cos \varphi_2$, А	1,21	2,37	3,47	5,09	6,33
$I_{2p}' = I_2' \sin \varphi_2$, А	0,08	0,19	0,57	1,25	1,95
$I_{2\text{ак}} = I_{2a}' + I_{2p}'$, А	1,65	2,82	3,91	5,54	6,77
$I_{1p} = I_{0p} + I_{2p}'$, А	1,85	1,96	2,34	3,02	3,72
$I_1 = \sqrt{I_{2a}'^2 + I_{2p}'^2}$, А	2,48	3,43	4,55	6,30	7,70
$\cos \varphi_1 = I_{2a}' / I_1$	0,66	0,82	0,86	0,88	0,88
$P_1 = 3 U_1 I_{1\omega}$ Вт	1089	1861	2580	3652	4468
$n_2 = 1500(1 - s)$, об/мин	1485	1470	1455	1430	1410
$P_{\text{эл}} = 3 I_1^2 r_1$, Вт	31,0	60,0	105	200	302
$P_{\text{эм}} = P_1 - P_{\text{эл}} - P_m$, Вт	975	1718	2392	3369	4083
$\beta^2 = (I_1 / I_{1\text{ном}})^2$	0,15	0,29	0,52	1,0	1,44
$P_{\text{доб}} = (0,005 P_{1\text{ном}}) \beta^2$, Вт	2,7	5,2	9,4	18	26
$P_{\text{эм}} = P_1 - P_{\text{эл}} - P_m$, Вт	975	1718	2392	3369	4083
$P_{\text{с2}} = s P_{\text{эм}}$, Вт	10	34	72	151	245
$P_2 = P_{\text{эм}} - P_{\text{с2}} - P_{\text{мех}} - P_{\text{доб}}$, Вт	762	1479	2110	3000	3612
$M_2 = 9,55 P_2 / n_2$	4,9	9,6	13,8	20,0	24,5
$\eta = P_2 / P_1$	0,70	0,79	0,82	0,82	0,81

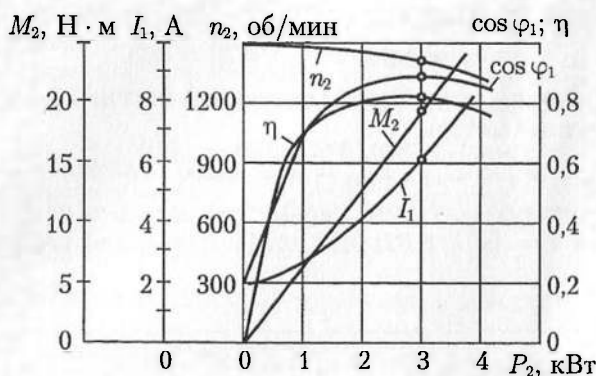


Рис. 3.12. Рабочие характеристики трехфазного асинхронного двигателя

выполняем расчет. Расчетные формулы и результаты расчета приведены в табл. 3.19. По полученным данным строим рабочие характеристики двигателя (рис. 3.12).

Пуск и регулирование частоты вращения

Задача 3.18. Для асинхронного двигателя с фазным ротором, данные которого приведены в табл. 3.20, номинальная мощность $P_{\text{ном}}$, номинальное скольжение $s_{\text{ном}}$, перегрузочная способность λ_m , число полюсов $2p$. Требуется рассчитать сопротивление сопротивлений резисторов трехступенчатого пускового реостата ПР (рис. 3.13).

Решение варианта 1.

1. Номинальная частота вращения

$$n_{\text{ном}} = n_1 (1 - s_{\text{ном}}) = 750 (1 - 0,05) = 712 \text{ об/мин.}$$

2. Номинальный момент двигателя

$$M_{\text{ном}} = 9,55 P_{\text{ном}} / n_{\text{ном}} = 9,55 \cdot 15\,000 / 712 = 201 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Таблица 3.20

Параметр	Варианты					
	1	2	3	4	5	6
$P_{\text{ном}}, \text{ кВт}$	15	75	22	5,5	14	7,5
$s_{\text{ном}}, \%$	8	4	8	8	4	6
λ_m	5	3,3	4	5,3	5	5
$r_2, \text{ Ом}$	0,37	0,014	0,053	0,150	0,095	0,130
$\lambda = M_{\text{max}} / M_{\text{ном}}$	3,0	2,0	2,0	1,7	1,7	1,7

3. Принимаем значение момента переключений, равным номинальному

$$M_2 = 1,0 M_{\text{ном}} = 1,0 \cdot 201 = 201 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

4. Отношение начального пускового момента к моменту переключений принимаем

$$\lambda = M_1 / M_2 = 2,1.$$

5. Начальный пусковой момент

$$M_1 = M_2 \lambda = 201 \cdot 2,1 = 422 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

т. е. $M_1 / M_{\text{max}} = 422 / (3 \cdot 201) = 0,7$; это позволяет применить аналитический метод расчета сопротивлений пускового реостата.

6. Сопротивление резистора третьей ступени ПР

$$r_{\text{доб3}} = r_2 (\lambda - 1) = 0,37 / (2,1 - 1) = 0,41 \text{ Ом}.$$

7. Сопротивление резистора второй ступени ПР

$$r_{\text{доб2}} = r_{\text{доб3}} \lambda = 0,41 \cdot 2,1 = 0,86 \text{ Ом}.$$

8. Сопротивление резистора первой ступени

$$r_{\text{доб1}} = r_{\text{доб2}} \lambda = 0,86 \cdot 2,1 = 1,80 \text{ Ом}.$$

9. Сопротивление ПР на первой ступени

$$R_{\text{ПР1}} = r_{\text{доб1}} + r_{\text{доб2}} + r_{\text{доб3}} = 1,80 + 0,86 + 0,41 = 3,07 \text{ Ом}.$$

10. Сопротивление ПР на второй ступени

$$R_{\text{ПР2}} = r_{\text{доб2}} + r_{\text{доб3}} = 0,86 + 0,41 = 1,27 \text{ Ом}.$$

11. Сопротивление ПР на третьей ступени

$$R_{\text{ПР3}} = r_{\text{доб3}} = 0,41 \text{ Ом}.$$

Задача 3.19. Трехфазный асинхронный двигатель с фазным ротором работает с нагрузкой на валу $M_2 = 0,75 M_{\text{ном}}$. Определить величину сопротивления резистора $r_{\text{доб}}$, который следует включить в каждую фазную обмотку ротора, чтобы частота вращения при указанной нагрузке составляла $n_2 = 0,5 n_1$. Необходимые данные двигателя приведены в табл. 3.21: номинальная мощность $P_{\text{ном}}$, напряжение статора фазное $U_{1\text{ф}}$, число полюсов $2p$, скольжение при номинальной нагрузке $s_{\text{ном}}$, сопротивление обмотки ротора при рабочей температуре r_2 .

Решение варианта 1.

1. Частота вращения в номинальном режиме

$$n_{\text{ном}} = n_1 (1 - s_{\text{ном}}) = 1500 (1 - 0,05) = 1425 \text{ об/мин}.$$

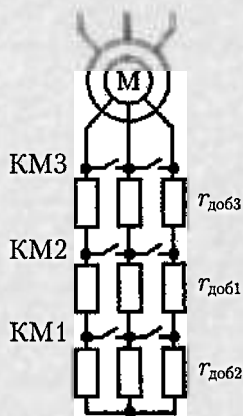


Рис. 3.13. Трехступенчатый пусковой реостат

Параметр	Варианты					
	1	2	3	4	5	6
$P_{\text{ном}}$, кВт	10	75	22	5,5	14	7,5
$U_{\text{ф}}$, В	220	220	220	220	220	220
$2p$	4	4	8	8	4	6
$s_{\text{ном}}$, %	5	3,3	4	5,3	5	5
r_2 , Ом	0,115	0,014	0,053	0,150	0,095	0,130

2. Момент на валу двигателя при номинальной нагрузке

$$M_{\text{ном}} = 9,55 P_{\text{ном}} / n_{\text{ном}} = 9,55 \cdot 10\,000 / 1425 = 67 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

3. Считая рабочий участок естественной механической характеристики двигателя прямолинейным, получим соотношение моментов нагрузки и соответствующих скольжений

$$M_2 / M_{\text{ном}} = s_{0,75} / s_{\text{ном}},$$

из которого определим скольжение $s_{0,75}$, соответствующее нагрузке на валу двигателя $M_2 = 0,75 M_{\text{ном}}$:

$$s_{0,75} = (0,75 M_{\text{ном}} s_{\text{ном}}) / M_{\text{ном}} = 0,75 s_{\text{ном}} = 0,75 \cdot 0,05 = 0,0375.$$

4. Скольжение при частоте вращения $n_2 = 0,5 n_{\text{ном}}$

$$s = (n_1 - 0,5 n_{\text{ном}}) / n_1 = (1500 - 0,5 \cdot 1425) / 1500 = 0,525.$$

5. Используя принцип пропорциональности между скольжением и активным сопротивлением в цепи ротора, определим сопротивление добавочного резистора $r_{\text{доб}}$, который необходимо включить в каждую фазную обмотку ротора, чтобы получить частоту вращения $0,5 n_{\text{ном}}$ при нагрузке на валу двигателя $M_2 = 0,75 M_{\text{ном}}$:

$$(r_{\text{доб}} + r_2) / r_2 = s / s_{0,75},$$

откуда сопротивление добавочного резистора

$$r_{\text{доб}} = (s - s_{0,75}) r_2 / s_{0,75} = (0,525 - 0,0375) 0,115 / 0,0375 = 1,49 \text{ Ом},$$

где $s = 0,525$ — скольжение при пониженной частоте вращения $n_2 = 0,5 n_{\text{ном}}$; $s_{0,75} = 0,0375$ — скольжение при нагрузке на валу двигателя $M_2 = 0,75 M_{\text{ном}}$; $r_2 = 0,115 \text{ Ом}$ — сопротивление фазной обмотки ротора при рабочей температуре.

Задача 3.20. Определить сопротивление резисторов $r_{\text{доб}}$, которые необходимо включить в цепь обмотки статора трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, чтобы снизить в два раза величину начального пускового тока статора; определить, на-

Параметр	Тип двигателя							
	АИР 90L4	АИР 100S4	АИР 100L4	АИР 112M2	АИР 132S4	АИР 80A4	АИР 132S8	АИР 80B4
$P_{\text{ном}}$, кВт	2,2	3,0	4,0	7,5	5,5	1,1	4,0	1,5
$U_{\text{лп}}$, В	220	220	220	220	220	220	220	220
$\eta_{\text{ном}}$, %	81	82	85	87,5	87,5	75	83	78
$\cos \varphi_{\text{ном}}$	0,83	0,83	0,84	0,88	0,88	0,81	0,70	0,83
$I_{\text{лп}}/I_{\text{ном}}$	6,5	7,0	7,5	5,0	7,0	5,5	6,0	5,5
$M_{\text{п}}/M_{\text{ном}}$	2,1	2,0	2,0	2,2	2,0	2,2	1,8	2,2
$\cos \varphi_{\text{к}}$	0,86	0,84	0,85	0,74	0,75	0,88	0,85	0,86

сколько при этом уменьшится пусковой момент двигателя. Требуемые для этого значения параметров двигателя приведены в табл. 3.22: номинальная мощность двигателя $P_{\text{ном}}$; напряжение питающей сети (фазное) $U_{\text{лп}}$; КПД $\eta_{\text{ном}}$; кратность пускового тока $I_{\text{лп}}/I_{\text{ном}}$; кратность пускового момента $M_{\text{п}}/M_{\text{ном}}$; коэффициенты мощности двигателя в режимах номинальной нагрузки $\cos \varphi_{\text{ном}}$ и короткого замыкания $\cos \varphi_{\text{к}}$; частота тока 50 Гц.

Решение варианта с двигателем АИР90L4.

Величина пускового тока асинхронного двигателя определяется его сопротивлением короткого замыкания

$$I_{\text{кз}} = U_{\text{лп}}/z_{\text{к.л}}$$

Поэтому для уменьшения пускового тока следует увеличить $z_{\text{к.л}}$ за счет его активной $r_{\text{к}}$ или индуктивной $x_{\text{к}}$ составляющих (рис. 3.14, а). Требуемое для этого значение составляющей сопротивления корот-

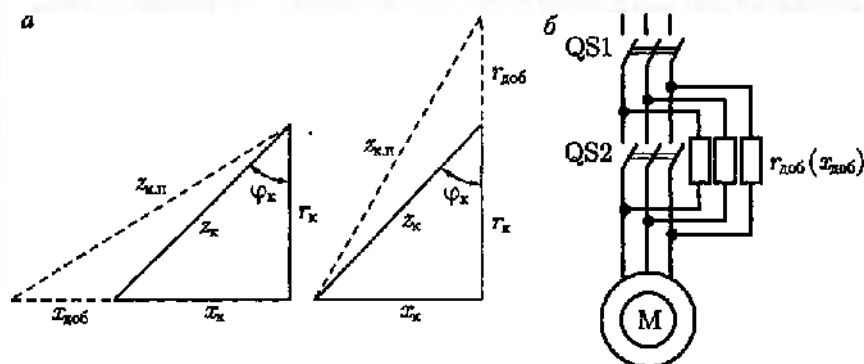


Рис. 3.14. Снижение пускового тока асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

кого замыкания r_k или x_k достигается последовательным включением в линейные провода питающей сети добавочного сопротивления (рис. 3.14, б). По окончании пуска рубильником QS2 эти сопротивления шунтируются и они не оказывают никакого влияния на работу двигателя. Применение в качестве добавочного индуктивного сопротивления (дресселя с сердечником) более экономично, так как активное сопротивление этих элементов незначительно и потери в них невелики. Однако в двигателях небольшой мощности для ограничения пускового тока чаще применяют резисторы, которые дешевле и имеют меньшие габариты, чем дроссели.

Величина добавочного сопротивления, необходимого для уменьшения пускового тока в k раз, определяется выражениями:

$$r_{доб} = \sqrt{(kz_k)^2 - x_k^2} - r_k;$$

$$x_{доб} = \sqrt{(kz_k)^2 - r_k^2} - x_k.$$

1. Номинальный ток статора (фазное значение)

$$I_{1ф} = P_{ном} / (3 U_{1ф} \eta_{ном} \cos \varphi_{ном}) = 2200 / (3 \cdot 220 \cdot 0,81 \cdot 0,83) = 5 \text{ A}.$$

2. Начальный пусковой ток (ток короткого замыкания)

$$I_{1ф.п} = I_{1ф} (I_{1п} / I_{1ном}) = 5 \cdot 6,5 = 32,5 \text{ A}.$$

3. Сопротивление короткого замыкания двигателя

$$z_k = U_{1ф} / I_{1ф.п} = 220 / 32,5 = 6,77 \text{ Ом}.$$

4. Активная и индуктивная составляющие сопротивления короткого замыкания

$$r_k = z_k \cos \varphi_k = 6,77 \cdot 0,86 = 5,82 \text{ Ом};$$

$$x_k = z_k \sin \varphi_k = 6,77 \cdot 0,51 = 3,45 \text{ Ом}.$$

5. Сопротивление добавочного резистора $r_{доб}$ для уменьшения начального пускового тока в два раза ($k = 2$)

$$r_{доб} = \sqrt{(kz_k)^2 - x_k^2} - r_k = \sqrt{(2 \cdot 6,77)^2 - 3,45^2} - 5,82 = 7,27 \text{ Ом}.$$

6. Мощность, рассчитываемая на этом резисторе,

$$P_{доб} = (I_{1ф.п} / 2)^2 r_{доб} = (32,5 / 2)^2 \cdot 7,27 = 1920 \text{ Вт},$$

учитывая кратковременность прохождения тока через резистор (обычно несколько секунд), эту мощность можно уменьшить в два раза.

7. Напряжение непосредственно на клеммах обмотки статора двигателя при пуске

$$U'_{1ф} \approx 220 - (I_{1ф.п} / 2) r_{доб} = 220 - (32,5 / 2) \cdot 7,27 = 102 \text{ В}.$$

Таким образом, напряжение, подводимое на клеммы обмотки статора, составит $102/220 = 0,46$ от номинального. При этом пусковой момент двигателя составит $0,46^2 = 0,21$ от $M_{\text{п}}$, т.е. он будет равен

$$0,21M_{\text{п}} = 0,21 \cdot 2,1M_{\text{ном}} = 0,44M_{\text{ном}}.$$

Следовательно, этот двигатель при пуске должен иметь нагрузку на валу не более 44 % от ее номинального значения.

Задача 3.21. Трехфазные асинхронные двигатели с фазным ротором серии 4А имеют следующие данные каталога, приведенные в табл. 3.23: номинальная мощность $P_{\text{ном}}$; номинальное скольжение $s_{\text{ном}}$; КПД $\eta_{\text{ном}}$; коэффициент мощности $\cos \varphi_{\text{ном}}$; ток ротора $I_{2\text{ном}}$; ЭДС ротора E_2 ; перегрузочная способность $\lambda_{\text{м}} = M_{\text{max}}/M_{\text{ном}}$.

Определить: номинальный $M_{\text{ном}}$ и максимальный M_{max} моменты, критическое скольжение $s_{\text{кр}}$ в режиме естественной механической характеристики; сопротивление пускового реостата $R_{\text{пр}}$, необходимое для получения кратности пускового момента $M_{\text{п}}/M_{\text{ном}} = 1,5$, и сопротивление $r_{\text{доб}}$, требуемое для получения частоты вращения $n_2 = 0,5n_1$ при номинальном нагрузочном моменте.

Решение варианта с двигателем 4АНК225М8.

1. Частота вращения в номинальном режиме

$$n_{\text{ном}} = n_1 (1 - s_{\text{ном}}) = 750 (1 - 0,05) = 712,5 \text{ об/мин.}$$

2. Номинальный момент

$$M_{\text{ном}} = 9,55P_{\text{ном}}/n_{\text{ном}} = 9,55 \cdot 30\,000/712,5 = 402 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

3. Максимальный момент

$$M_{\text{max}} = M_{\text{ном}}\lambda_{\text{м}} = 402 \cdot 1,8 = 723,6 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Таблица 3.23

Тип двигателя	$P_{\text{ном}}$, кВт	$2p$	n_1 , об/мин	$\eta_{\text{ном}}$, %	$\cos \varphi_{\text{ном}}$	$I_{2\text{ном}}$, А	E_2 , В	$M_{\text{max}}/M_{\text{ном}}$
4АНК225М8	30	8	5	86,5	0,80	165	120	1,8
4АНК250SM8	37	8	5,5	87,5	0,80	190	115	2,2
4АНК250B8	45	8	4	89	0,82	190	140	2,2
4АНК250M8	55	8	3,5	89,5	0,83	185	190	2,2
4АНК280S8	75	8	4	90,5	0,84	257	190	1,9
4АНК280M8	90	8	4	90,5	0,84	267	214	1,9
4АНК315S8	110	8	3,5	91,5	0,84	311	225	1,9
4АНК315M8	132	8	3,5	92	0,84	364	247	1,9
4АНК355S8	160	8	2,7	92,5	0,86	353	285	1,7
4АНК355M8	200	8	2,7	92,5	0,86	359	350	1,7

4. Критическое скольжение в режиме естественной механической характеристики

$$s_{кр} = s_{ном} (\lambda_m + \sqrt{\lambda_m^2 - 1}) = 0,05 (1,8 + \sqrt{1,8^2 - 1}) = 0,16.$$

5. Активное сопротивление фазной обмотки ротора при рабочей температуре

$$\tau_2 = [E_2 / (\sqrt{3} I_{2ном})] s_{ном} = [120 / (1,73 \cdot 165)] 0,05 = 0,021 \text{ Ом}.$$

6. Скольжение s' в режиме естественной механической характеристики ($R_{пр} = 0$) при моменте нагрузки, равном $1,5 M_{ном}$. С некоторым приближением примем рабочий участок естественной механической характеристики, т. е. участок при $s < s_{кр}$ прямолинейным и запишем равенство

$$M_{ном} / s_{ном} = 1,5 M_{ном} / s',$$

откуда

$$s' = 1,5 s_{ном} = 1,5 \cdot 0,05 = 0,075.$$

7. Используя принцип равенства отношений сопротивлений в цепи фазной обмотки ротора к скольжению для естественной и искусственной механических характеристик при одинаковом нагрузочном моменте, запишем равенство:

$$(\tau_2 + R_{пр}) / \tau_2 = 1 / s',$$

где $R_{пр} = \tau_2 + r_{доб}$ — сопротивление пускового реостата, при котором пусковой момент $M_{п} = 1,5 M_{ном}$, откуда требуемое сопротивление пускового реостата

$$R_{пр} = (\tau_2 / s') - \tau_2 = (0,021 / 0,075) - 0,021 = 0,26 \text{ Ом}.$$

8. Сопротивление резисторов $r_{доб}$, которые необходимо включить последовательно в цепи фазных обмоток ротора для получения частоты вращения, $n_2 = 0,5 n_1 = 375$ об/мин, определим, используя принцип равенства отношения сопротивления цепи ротора в режимах искусственной и естественной характеристик отношению соответствующих скольжений:

$$(\tau_2 + r_{доб}) / \tau_2 = s_{0,5} / s_{ном},$$

где $s_{0,5} = 0,5$ — скольжение при частоте вращения ротора $0,5 n_1$.

Из полученного равенства требуемое сопротивление резистора

$$r_{доб} = \tau_2 (s_{0,5} / s_{ном}) - \tau_2 = 0,021 (0,5 / 0,05) - 0,021 = 0,19 \text{ Ом}.$$

Задача 3.22. Трехфазный асинхронный двигатель серии 4А, включенный в сеть с линейным напряжением $U_{л} = 380$ В при соединении обмотки статора «треугольником», имеет номинальные данные: мощность $P_{ном}$, частоту вращения $n_{ном}$, КПД $\eta_{ном}$, коэффициент мощно-

сти $\cos \varphi_{1\text{ном}}$, кратности пускового тока $\lambda_{\text{п}}$, пускового момента $\lambda_{\text{п}}$, максимального момента $\lambda_{\text{м}}$ (табл. 3.24).

Требуется определить:

- 1) вращающие моменты двигателя — номинальный, пусковой, максимальный;
- 2) потребляемые мощность и ток статора при номинальной нагрузке;
- 3) пусковые ток статора и момент, а также перегрузочную способность двигателя при соединении обмотки статора «звездой» при прежнем напряжении питающей сети;
- 4) при каком фазном напряжении статора двигатель утрачивает перегрузочную способность, т. е. $\lambda_{\text{м}} = 1$.

Таблица 3.24

Тип двигателя	$P_{\text{ном}}$, кВт	$n_{\text{ном}}$, об/мин	$\eta_{\text{ном}}$, %	$\cos \varphi_{1\text{ном}}$	$\lambda_{\text{п}}$	$\lambda_{\text{п}}$	$\lambda_{\text{м}}$
4АН160S4	18,5	1450	88,5	0,87	6,5	1,3	2,1
4АН200М4	45	1475	91	0,89	6,5	1,3	2,5
4АН280М4	160	1470	93,5	0,90	6,0	1,2	2,0
4АН200М6	30	975	90	0,88	6,0	1,3	2,1
4АН280М6	110	980	92,5	0,89	6,0	1,2	2,0
4АН280М8	90	735	92,5	0,86	5,5	1,2	1,9

Решение варианта с двигателем 4АН160S4.

1. Номинальный момент

$$M_{\text{ном}} = 9,55 P_{\text{ном}} / n_{\text{ном}} = 9,55 \cdot 18\,500 / 1450 = 121,8 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

2. Пусковой момент

$$M_{\text{п}} = M_{\text{ном}} \lambda_{\text{п}} = 121,8 \cdot 1,3 = 158 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

3. Максимальный момент

$$M_{\text{max}} = M_{\text{ном}} \lambda_{\text{м}} = 121,8 \cdot 2,1 = 256 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

4. Потребляемая двигателем мощность в номинальном режиме

$$P_{1\text{ном}} = P_{\text{ном}} / \eta_{\text{ном}} = 18,5 / 0,885 = 20,9 \text{ кВт}.$$

5. Номинальные токи в цепи обмотки статора:
фазный ток

$$I_{1\text{ф}} = P_{1\text{ном}} / (m_1 U_{1\text{ф}} \cos \varphi_{1\text{ном}}) = 20\,900 / (3 \cdot 380 \cdot 0,87) = 21,1 \text{ А}.$$

линейный ток

$$I_{1\text{л}} = \sqrt{3} I_{1\text{ф}} = 1,73 \cdot 21,1 = 36,5 \text{ А}.$$

6. Пусковой (линейный) ток в питающей сети

$$I_{\text{п.л}} = I_{1\text{л}} \lambda_{\text{п}} = 36,5 \cdot 6,5 = 237 \text{ А}.$$

7. Номинальный и пусковой токи при соединении обмотки статора «звездой».

В этом случае фазное напряжение статора уменьшается до значения

$$U_{1\phi Y} = U_{1\phi \Delta} / \sqrt{3} = 380 / 1,73 = 220 \text{ В.}$$

Фазный ток статора также уменьшается на 1,73, т. е. становится равным

$$I_{1\phi Y} = I_{1\phi \Delta} / \sqrt{3} = 21,1 / 1,73 = 12,2 \text{ А,}$$

что же касается линейного тока, то он при соединении «звездой» уменьшится в 3 раза

$$I_{1\lambda Y} = I_{1\lambda \Delta} / 3 = 36,5 / 3 = 12,2 \text{ А.}$$

Также в 3 раза уменьшится пусковой ток в линейных проводах питающей сети

$$I_{п.л Y} = I_{п.л \Delta} / 3 = 237 / 3 = 79 \text{ А.}$$

8. Номинальный и пусковой моменты двигателя при соединении обмотки статора «звездой».

Так как момент асинхронного двигателя пропорционален квадрату напряжения статора, при уменьшении фазного напряжения в $\sqrt{3}$ раз моменты двигателя уменьшатся в 3 раза:

$$M_Y = M_{\Delta} / 3 = 121,8 / 3 = 40,6 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{п Y} = M_{п \Delta} / 3 = 158 / 3 = 52,7 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{\max Y} = M_{\max \Delta} / 3 = 256 / 3 = 85,3 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

При этом перегрузочная способность двигателя уменьшится в 3 раза и составит $\lambda_{м Y} = \lambda_{м \Delta} / 3 = 2,1 / 3 = 0,7$.

9. Напряжение (фазное) $U'_{1\phi}$, при котором двигатель утрачивает перегрузочную способность, т. е. $\lambda'_м = M_{\max} / M_{ном} = 1$.

Так как момент асинхронного двигателя пропорционален квадрату напряжения статора, двигатель утратит перегрузочную способность при уменьшении напряжения до значения

$$U'_{1\phi} = U_{1\phi} / \sqrt{\lambda'_м} = 380 / \sqrt{2,1} = 262 \text{ В.}$$

СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

4.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

Характерным признаком синхронных машин является жесткая связь между частотой вращения ротора n_1 и частотой переменного тока в обмотке статора f_1 :

$$n_1 = f_1 \cdot 60/p.$$

Другими словами, вращающееся магнитное поле статора и ротор синхронной машины вращаются *синхронно*, т. е. с одинаковой частотой.

По своей конструкции синхронные машины разделяются на явнополюсные и неявнополюсные. В явнополюсных синхронных машинах ротор имеет явно выраженные полюса, на которых располагают катушки обмотки возбуждения, питаемые постоянным током. Характерным признаком таких машин является различие магнитного сопротивления по продольной оси (по оси полюсов) и по поперечной оси (по оси, проходящей в межполюсном пространстве). Магнитное сопротивление потоку статора по продольной оси dd намного меньше магнитного сопротивления потоку статора по поперечной оси qq . В неявнополюсных синхронных машинах магнитные сопротивления по продольной и поперечной осям одинаковы, поскольку воздушный зазор у этих машин по периметру статора одинаков.

Конструкция статора синхронной машины в принципе не отличается от статора асинхронной машины. В обмотке статора в процессе работы машины индуцируются ЭДС и протекают токи, которые создают магнитодвижущую силу (МДС), максимальное значение которой

$$F = 0,45 \pi I_1 m_{kz} / p.$$

Эта МДС создает вращающееся магнитное поле, а в воздушном зазоре δ машины создается магнитная индукция, график распределения которой в пределах каждого полюсного деления τ зависит от конструкции ротора (рис. 4.1).

Для явнополюсной синхронной машины справедливо уравнение напряжений:

$$U_1 = \dot{E}_0 + \dot{E}_{1d} + \dot{E}_{1q} + \dot{E}_{\sigma 1} - I_1 r_1,$$

где $\dot{E}_0$ — основная ЭДС синхронной машины, пропорциональная основному магнитному потоку синхронной машины Φ_0 ; $\dot{E}_{1d}$ — ЭДС

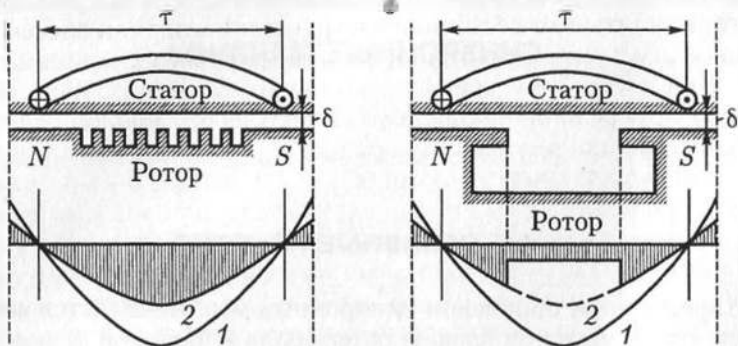


Рис. 4.1. Графики распределения магнитной индукции по поперечной оси неявнополюсной (а) и явнополюсной (б) синхронных машин:

1 — график МДС; 2 — график магнитной индукции

реакции якоря синхронной машины по продольной оси, пропорциональная МДС реакции якоря по продольной оси $F_{1\delta}$; $\dot{E}_\sigma$ — ЭДС реакции якоря по поперечной оси, пропорциональная МДС реакции якоря по поперечной оси $F_{1\varphi}$; $\dot{E}_{\sigma 1}$ — ЭДС рассеяния, обусловленная наличием магнитного потока рассеяния Φ_σ , величина этой ЭДС пропорциональна индуктивному сопротивлению рассеяния обмотки статора x_1

$$\dot{E}_{\sigma 1} = -jI_1 x_1,$$

$I_1 r_1$ — активное падение напряжения в фазной обмотке статора, обычно этой величиной при решении задач пренебрегают ввиду ее небольшого значения.

Для неявнополюсной синхронной машины уравнение напряжений имеет вид

$$\dot{U}_1 = \dot{E}_0 + \dot{E}_\sigma - I_1 \dot{r}_1.$$

Здесь

$$\dot{E}_\sigma = \dot{E}_1 + \dot{E}_{\sigma 1}$$

где $\dot{E}_1$ — ЭДС реакции якоря неявнополюсной синхронной машины.

Рассмотренным уравнениям напряжений соответствуют векторные диаграммы напряжений. Эти диаграммы приходится строить для определения либо основной ЭДС машины E_0 , либо напряжения обмотки статора U_1 . Следует иметь в виду, что уравнения напряжений и соответствующие им векторные диаграммы не учитывают магнитного насыщения магнитопровода синхронной машины, которое, как известно, влияет на величину индуктивных сопротивлений, вызывая их уменьшение. Учет этого насыщения представляет сложную задачу, поэтому при расчетах ЭДС и напряжений синх-

ронных машин обычно пользуются *практической диаграммой ЭДС*, которая учитывает состояние насыщения магнитной системы, вызванное действием реакции якоря при нагрузке синхронной машины. При построении практической диаграммы ЭДС намагничивающую силу реакции якоря не разлагают на продольную и поперечную составляющие, поэтому эта диаграмма может быть применена как при расчетах явнополюсных, так и неявнополюсных машин.

При решении задач, связанных либо с синхронными генераторами, включенными параллельно с сетью, либо с синхронными двигателями, пользуются *угловыми характеристиками* синхронных машин, представляющими собой зависимость электромагнитного момента M от угла нагрузки θ . При этом следует помнить, что в явнополюсных синхронных машинах действуют два момента: основной $M_{\text{осн}}$ и реактивный M_p , а в неявнополюсных машинах — только основной момент:

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

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

Угол нагрузки $\theta_{\text{ном}}$ соответствует номинальному моменту $M_{\text{ном}}$. Максимальный момент синхронной машины определяет перегрузочную способность синхронной машины, что имеет важное значение как для синхронных генераторов, работающих параллельно с сетью, так и для синхронных двигателей. В неявнополюсных синхронных машинах максимальный момент соответствует углу нагрузки $\theta = 90^\circ$, в явнополюсных машинах $\theta_{\text{кр}} < 90^\circ$ и обычно составляет $60-80^\circ$ в зависимости от соотношения основного и реактивного электромагнитных моментов этой машины.

Для расчета критического угла нагрузки, определяющего перегрузочную способность явнополюсных синхронных машин, можно воспользоваться выражением:

$$\cos \theta_{\text{кр}} = \sqrt{\beta^2 + 0,5} - \beta,$$

где

$$\beta = E_0 / \left[4U_1 (x_d/x_q - 1) \right]$$

При расчетах параметров синхронных машин применяют U -образные характеристики, представляющие собой зависимость тока статора I_1 от тока в обмотке возбуждения I_b при постоянной нагрузке P_2 . При этом изменение тока в цепи статора $\dot{I}_1 = I_{1a} + jI_{1p}$ происходит лишь за счет его реактивной составляющей jI_{1p} . Поэтому регулировка величины тока возбуждения I_b сопровождается одновременным изменением не только тока статора, но и коэффициента

мощности $\cos \varphi$. Активная составляющая тока статора I_a при этом остается неизменной. Создавая режим *перевозбуждения* $I_b > I_{b0}$, вызывают *опережение* по фазе тока сети $\dot{I}_c$ относительно напряжения U_1 , что способствует повышению коэффициента мощности в сети.

Энергетические характеристики в синхронной машине зависят от режима ее работы. Если машина работает в режиме генератора, то подводимая к генератору механическая мощность определяется вращающим моментом приводного двигателя M_1 и частотой вращения n_1

$$P_1 = 0,105 M_1 n_1.$$

Часть этой мощности расходуется на покрытие механических $P_{\text{мех}}$, магнитных P_m и добавочных P_d потерь. Если возбуждение генератора происходит от возбудителя, приводимого во вращение от общего приводного двигателя, то к перечисленным потерям добавляются еще и потери на возбуждение

$$P_b = U_b I_b / \eta_b,$$

где U_b и I_b — напряжение и ток в цепи возбуждения; η_b — КПД возбудителя.

Оставшаяся после вычитания перечисленных потерь мощность, представляет собой электромагнитную мощность генератора $P_{\text{эм}}$, которая передается на статор генератора электромагнитным путем. Полезная мощность на выходе генератора P_2 меньше электромагнитной мощности на величину электрических потерь в обмотке статора

$$P_{\text{эл}} = m_1 I_1^2 r_1.$$

Суммарные потери синхронного генератора

$$\sum P = P_{\text{мех}} + P_m + P_b + P_{\text{доб}} + P_{\text{эл}}.$$

Полезная мощность генератора

$$P_2 = S_2 \cos \varphi_1 = m_1 U_1 I_1 \cos \varphi_1,$$

где $S_2 = m_1 U_1 I_1$ — полная мощность на выходе генератора, В · А; $\cos \varphi_1$ — коэффициент мощности в цепи нагрузки генератора.

Если синхронная машина работает в режиме двигателя, то виды потерь остаются прежними, но электрическая мощность на входе двигателя

$$P_1 = S_1 \cos \varphi_1 = m_1 U_1 I_1 \cos \varphi_1,$$

а мощность на выходе двигателя является механической

$$P_2 = 0,105 M_2 n_1.$$

Коэффициент полезного действия синхронной машины

$$\eta = P_2 / P_1.$$

4.2. ЗАДАЧИ

Синхронные генераторы

Задача 4.1. Параметры трехфазного синхронного генератора (табл. 4.1): номинальное (линейное) напряжение на выходе $U_{\text{ном}}$ при частоте тока 50 Гц, обмотка статора соединена «звездой», номинальный ток статора $I_{\text{ном}}$, КПД генератора при номинальной нагрузке $\eta_{\text{ном}}$, число полюсов $2p$, мощность на входе генератора $P_{\text{ном}}$, полезная мощность на выходе генератора $P_{\text{ном}}$, суммарные потери в режиме номинальной нагрузки $\Sigma P_{\text{ном}}$, полная номинальная мощность на выходе $S_{\text{ном}}$, коэффициент мощности нагрузки, подключенной к генератору, $\cos \varphi_{\text{ном}}$, вращающий момент первичного двигателя при номинальной нагрузке генератора $M_{\text{ном}}$. Требуется определить параметры, значения которых в табл. 4.1 не указаны.

Таблица 4.1

Параметр	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$S_{\text{ном}}$, кВ·А	330	—	270	470	—	600	780	450	700	500
$U_{\text{ном}}$, кВ	6,3	3,2	0,4	—	0,7	3,2	6,3	0,4	—	3,2
$\eta_{\text{ном}}$, %	92	—	—	91	90	93	—	—	93	92
$2p$	6	8	—	6	10	12	6	—	6	10
$P_{\text{ном}}$, кВт	—	—	206	—	—	—	667,4	369,5	—	—
$\Sigma P_{\text{ном}}$, кВт	—	27	18	—	—	—	—	—	—	—
$\cos \varphi_{\text{ном}}$	0,9	—	0,85	0,9	—	0,92	—	0,9	0,92	0,85
$I_{\text{ном}}$, А	—	72,2	—	43,1	190	—	—	—	64,2	—
$P_{\text{ном}}$, кВт	—	340	—	—	190	—	717,6	—	—	—
$M_{\text{ном}}$, Н·м	—	—	—	—	—	—	—	7735	—	—

Решение варианта 1.

1. Полезная мощность на выходе генератора

$$P_{\text{ном}} = S_{\text{ном}} \cos \varphi_{\text{ном}} = 330 \cdot 0,9 = 297 \text{ кВт.}$$

2. Мощность на входе генератора

$$P_{\text{ном}} = P_{\text{ном}} / \eta_{\text{ном}} = 297 / 0,92 = 322,8 \text{ кВт.}$$

3. Суммарные потери

$$\Sigma P_{\text{ном}} = P_{\text{ном}} - P_{\text{ном}} = 322,8 - 297 = 25,8 \text{ кВт.}$$

4. Ток статора в номинальном режиме

$$I_{1\text{ном}} = S_{\text{ном}} / (\sqrt{3} U_{1\text{ном}}) = 330 / (1,73 \cdot 6,3) = 30,2 \text{ А.}$$

5. Синхронная частота вращения при $2p = 6$ и частоте тока $f_1 = 50$ Гц:

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

6. Момент приводного двигателя, необходимый для вращения ротора генератора с синхронной частотой вращения в режиме номинальной нагрузки,

$$M_{1\text{ном}} = 9,55 \cdot 10^3 \cdot P_{1\text{ном}} / n_1 = 9,55 \cdot 10^3 \cdot 322,8 / 1000 = 3083 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Задача 4.2. Технические данные трехфазных синхронных явнополюсных генераторов приведены в табл. 4.2: основная ЭДС генератора (фазное значение) E_0 , номинальный ток нагрузки генератора (фазный) $I_{1\text{ном}}$, угол фазового сдвига Ψ_1 между векторами основной ЭДС E_0 и тока нагрузки $I_{1\text{ном}}$ (нагрузка активно-индуктивная), индуктивные сопротивления — рассеяния обмотки статора x_1 , реакции якоря по продольной оси x_{ad} , реакции якоря по поперечной оси x_{aq} .

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.

Таблица 4.2

Параметр	Варианты						
	1	2	3	4	5	6	7
E_0 , В	280	275	284	298	260	265	290
$I_{1\text{ном}}$, А	54	90	108	120	36	28	140
Ψ_1 , град	50	48	50	45	55	48	54
x_1 , Ом	0,52	0,15	0,12	0,08	0,44	0,48	0,07
x_{ad} , Ом	1,0	1,32	1,24	1,18	1,65	1,82	1,05
x_{aq} , Ом	0,74	0,55	0,48	0,32	1,15	1,22	0,90

Решение варианта 1.

1. Уравнение напряжений явнополюсного синхронного генератора

$$\vec{U}_1 = \vec{E}_0 + \vec{E}_{ad} + \vec{E}_{aq} + \vec{E}_{x1}$$

2. ЭДС реакции якоря по продольной оси

$$\vec{E}_{ad} = -j I_{1\text{ном}} x_{ad} \sin \Psi_1 = -j 54 \cdot 1,0 \cdot 0,766 = -j 41,4 \text{ В.}$$

3. ЭДС реакции якоря по поперечной оси

$$E_{1\sigma} = -j I_{1\text{ном}} x_{1\sigma} = -j 54 \cdot 0,52 = -j 28 \text{ В.}$$

4. ЭДС рассеяния

$$\dot{E}_{1\sigma} = -j I_{1\text{ном}} x_1 = -j 54 \cdot 0,52 = -j 28 \text{ В.}$$

5. Векторную диаграмму напряжений строим в следующем порядке (рис. 4.2): из начала диаграммы (точка O) в произвольном направлении проводим вектор тока $\dot{I}_{1\text{ном}}$; от этого вектора под углом ψ , в принятом масштабе напряжения $m_U = 2 \text{ В/мм}$ проводим вектор основной ЭДС $\dot{E}_0$. Учитывая размагничивающее влияние реакции якоря при индуктивном характере нагрузки, из конца вектора ЭДС $\dot{E}_0$ в обратном направлении проводим вектор ЭДС реакции якоря по продольной оси $\dot{E}_{1d}$. Далее из конца этого вектора под углом 90° к вектору основной ЭДС $\dot{E}_0$ проводим вектор ЭДС реакции якоря по поперечной оси $\dot{E}_{1q}$, затем под углом 90° к вектору тока из конца вектора $\dot{E}_{1q}$ проводим вектор ЭДС рассеяния $\dot{E}_{1\sigma}$. Соединив начало диаграммы (точка O) с концом вектора $\dot{E}_{1\sigma}$, получим вектор номинального напряжения на выходе генератора $\dot{U}_{1\text{ном}}$. Измерив его длину (115,5 мм) и умножив его на масштаб напряжения $m_U = 2 \text{ В/мм}$, определяем значение этого напряжения

$$U_{1\text{ном}} = 115,5 \cdot 2 = 231 \text{ В.}$$

При соединении обмотки статора «звездой» линейное напряжение на выводах обмотки статора равно $U_{1л} = 231 \cdot 1,73 = 400 \text{ В}$.

Измерив угол между векторами $\dot{U}_{1\text{ном}}$ и $\dot{I}_{1\text{ном}}$, определяем фазовый сдвиг $\varphi_{1\text{ном}} = 40^\circ$ и коэффициент мощности $\cos \varphi_{1\text{ном}} = 0,766$ (инд.).

6. Полная номинальная мощность на выходе генератора

$$\begin{aligned} S_{\text{ном}} &= 3 U_{1\text{ном}} I_{1\text{ном}} = \\ &= 3 \cdot 231 \cdot 54 \cdot 10^{-3} = 37,4 \text{ кВ} \cdot \text{А.} \end{aligned}$$

7. Активная мощность на выходе генератора

$$\begin{aligned} P_{1\text{ном}} &= S_{\text{ном}} \cos \varphi_{1\text{ном}} = \\ &= 37,4 \cdot 0,766 = 28,6 \text{ кВт.} \end{aligned}$$

8. Номинальное изменение напряжения при сбросе нагрузки

$$\begin{aligned} \Delta U_{\text{ном}} &= [(E_0 - U_{1\text{ном}})/U_{1\text{ном}}] 100 = \\ &= [(280 - 231)/231] 100 = 21,2 \%, \end{aligned}$$

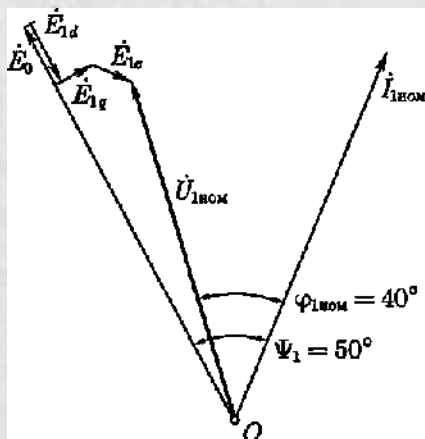


Рис. 4.2. Векторная диаграмма ЭДС синхронного явнополюсного генератора при активно-индуктивной нагрузке

т. е. при сбросе нагрузки от номинальной до режима холостого хода напряжение на выходе генератора увеличивается на 21,2 %.

Задача 4.3. Используя значения величин, приведенных в табл. 4.2, определить требуемые параметры генератора для случая активно-емкостной нагрузки; угол фазового сдвига между векторами ЭДС $\dot{E}_0$ и током нагрузки $I_{1\text{ном}}$ принять $\Psi'_1 = 0,5\Psi_1$.

Решение варианта 1.

1. При решении задачи 4.2 определены значения:

$$\dot{E}_{1d} = -j41,4 \text{ В}; \quad \dot{E}_{1q} = -j25,7 \text{ В}; \quad \dot{E}_{1\sigma} = -j28 \text{ В}.$$

2. При емкостном характере нагрузки ток опережает по фазе ЭДС, поэтому при построении векторной диаграммы вектор тока нагрузки $\dot{I}_{1\text{ном}}$ смещаем влево от вектора ЭДС $\dot{E}_0$ на угол $\Psi'_1 = 0,5\Psi_1 = 0,5 \cdot 54 = 27^\circ$ (рис. 4.3). Известно, что при емкостном характере нагрузки реакция якоря оказывает на генератор подмагничивающий характер. Поэтому вектор ЭДС $\dot{E}_{1d}$ откладывают в направлении вектора основной ЭДС $\dot{E}_0$. В остальном порядок построения векторной диаграммы такой же, что и при построении диаграммы в задаче 4.2. В результате построений получен вектор номинального напряжения $\dot{U}_{1\text{ном}}$

длиной 170 мм. С учетом принятого масштаба напряжения $m_U = 2 \text{ В/мм}$, определяем напряжение $U_{1\text{ном}} = 340 \text{ В}$, при этом линейное напряжение $U_{1л} = 640 \text{ В}$. Угол фазового сдвига между векторами тока $\dot{I}_{1\text{ном}}$ и напряжения $\dot{U}_{1\text{ном}}$ составляет $\varphi_{1\text{ном}} = 36^\circ$, а коэффициент мощности $\cos \varphi_{1\text{ном}} = 0,809$ (емк.).

3. Полная номинальная мощность на выходе генератора

$$\begin{aligned} S_{\text{ном}} &= 3 U_{1\text{ном}} I_{1\text{ном}} \cdot 10^{-3} = \\ &= 3 \cdot 340 \cdot 54 \cdot 10^{-3} = 55 \text{ кВ} \cdot \text{А}. \end{aligned}$$

4. Активная мощность на выходе генератора

$$\begin{aligned} P_{\text{ном}} &= S_{\text{ном}} \cos \varphi_{1\text{ном}} \\ &= 55 \cdot 0,809 = 44,5 \text{ кВт}. \end{aligned}$$

5. Номинальное изменение напряжения генератора при сбросе нагрузки

$$\begin{aligned} \Delta U_{\text{ном}} &= [(E_0 - U_{1\text{ном}}) / U_{1\text{ном}}] 100 = \\ &= [(280 - 340) / 340] 100 = -17,6 \%, \end{aligned}$$

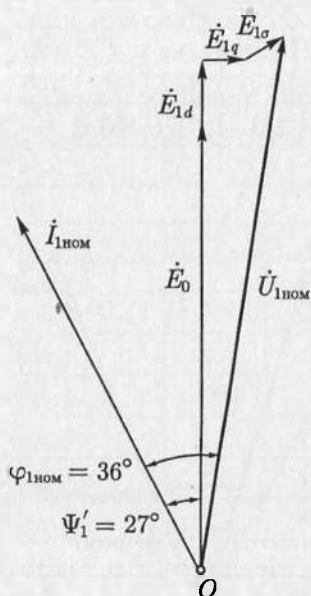


Рис. 4.3. Векторная диаграмма напряжений синхронного явнополюсного генератора при активно-емкостной нагрузке

т. е. при сбросе нагрузки напряжение на выходе генератора *увеличивается* на 17,6 %.

Сравнение результатов решения задач 4.2 и 4.3 показывает, что свойства синхронных генераторов (номинальные значения полной и активной мощностей, номинальное изменение напряжения при сбросе нагрузки) в значительной степени зависят от характера нагрузки.

Задача 4.4. Трехфазный синхронный генератор номинальной мощностью $P_{\text{ном}}$ и номинальным (фазным) напряжением $U_{1\text{ф.ном}}$ работает с коэффициентом мощности $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,8$ (инд.). Обмотка фазы статора имеет индуктивное сопротивление рассеяния x_1 (табл. 4.3); отношение короткого замыкания ОКЗ, 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 статора пренебречь. Характеристика холостого хода генератора нормальная.

Таблица 4.3

Параметр	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$U_{1\text{ф.ном}}$, В	230	230	230	400	400	400	400	230	230	230
ОКЗ	1,4	1,2	1,3	1,1	1,4	1,1	1,2	1,3	1,2	1,4
x_1 , Ом	0,15	0,32	0,45	0,32	0,28	0,25	0,18	0,32	0,32	0,18

Решение варианта 1.

1. Номинальный ток статора

$$I_{1\text{ном}} = S_{\text{ном}} / (m_1 U_{1\text{ном}} \cos \varphi_{1\text{ном}}) = 55\,000 / (3 \cdot 230 \cdot 0,8) = 100 \text{ А.}$$

2. Индуктивное падение напряжения

$$\dot{E}_{1\sigma} = j \dot{I}_{1\text{ном}} x_1 = 100 \cdot j 0,15 = j 15 \text{ В,}$$

или в относительных единицах

$$E_{\sigma^*} = E_{1\sigma} / U_{1\text{ном}} = j 35 / 230 = j 0,15.$$

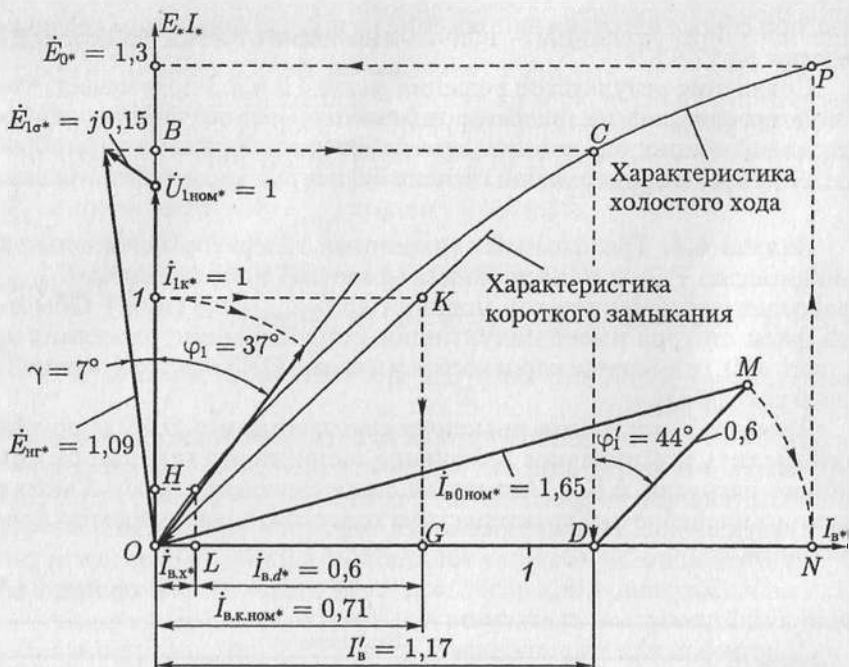
3. Построение практической диаграммы ЭДС (рис. 4.4).

3.1. Строим нормальную характеристику холостого хода в относительных единицах $E_{0^*} = f(I_{B^*})$ по следующим данным:

E_{0^*} _____	0,58	1,0	1,21	1,33	1,40	1,46	1,51
I_{B^*} _____	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5

где

$$E_{0^*} = E_0 / U_{1\text{ном}}; I_{B^*} = I_B / I_{B0\text{ном}}.$$



Здесь E_0 — основная ЭДС генератора; I_b — ток возбуждения генератора в режиме холостого хода; $I_{b0\text{ном}}$ — ток возбуждения, соответствующий основной ЭДС генератора в режиме холостого хода E_0 .

3.2. В этих же осях координат (см. рис. 4.4) строим характеристику короткого замыкания в относительных единицах $I_{к*} - f(I_{в*})$, где

$$I_{K^*} = I_{1K} / I_{1\text{HOM}}.$$

Характеристику короткого замыкания, имеющую прямолинейный вид, строим по двум точкам: точка O — начало осей координат и точка K с координатами $I_{K*} = 1$ и $I_{B.K.ном*}$.

Ток $I_{\text{в.к.ном}}$ * представляет собой ток возбуждения, соответствующий номинальному току нагрузки генератора $I_{\text{ном}}$, определим его величину, используя $\text{ОКЗ} = 1,4$ (отношение короткого замыкания),

$$OK3 = I_{B0HOM} / I_{B.K.HOM},$$

откуда

$$I_{B.K.HOM*} - I_{B.K.HOM}/I_{B0HOM} = 1/OK3 = 1/1,4 = 0,71.$$

3.3. На оси ординат строим вектор $U_{\text{ном}}^* = 1$ и под углом

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

проводим прямую линию — направление тока статора, на которой строим вектор $I_{1\text{ном}}^* = 1$, для чего деление 1 с оси ординат посредством циркуля переносим на линию — направление тока.

3.4. Из конца вектора напряжения $U_{1\text{ном}}^*$ под углом 90° к направлению тока статора проводим вектор ЭДС рассеяния (индуктивно-го падения напряжения)

$$\vec{E}_{1\sigma}^* = j0,15.$$

3.5. Соединив точку начала осей координат O с концом вектора $\vec{E}_{1\sigma}^*$, получим вектор ЭДС нагруженного генератора

$$\vec{E}_{1\sigma}^* = \vec{U}_{1\text{ном}}^* - \vec{E}_{1\sigma}^* = 1,09.$$

3.6. Проектируем конец вектора $\vec{E}_{1\sigma}^*$ на характеристику холостого хода и получаем отрезок BC , который затем проектируем на ось абсцисс и определяем величину тока возбуждения $I_b^* = 1,17$, соответствующую ЭДС нагруженного генератора $\vec{E}_{1\sigma}^* = 1,09$.

3.7. Определим величину тока возбуждения $I_{b,x}^*$, компенсирующего ЭДС рассеяния $\vec{E}_{1\sigma}^* = j0,15$; с этой целью на оси ординат в точке O построим вектор $\vec{E}_{\sigma}^*$, полученную точку H перенесем на характеристику холостого хода, а затем на ось абсцисс и получим значение тока возбуждения $I_{b,x}^* = 0,11$, эквивалентного ЭДС рассеяния $\vec{E}_{1\sigma}^* = j0,15$.

3.8. При работе синхронного генератора без нагрузки (режим холостого хода) его основная ЭДС E_0^* больше, чем ЭДС $\vec{E}_{1\sigma}^*$, на величину ЭДС реакции якоря по продольной оси $\vec{E}_{1d}^*$, т. е.

$$\vec{E}_0^* = \vec{E}_{1\sigma}^* + \vec{E}_{1d}^*$$

Для учета $\vec{E}_{1d}^*$ определим ток возбуждения I_{bd}^* , соответствующий продольно-размагничивающему действию реакции якоря. Величина I_{bd}^* определяется отрезком LG на оси абсцисс: $I_{bd}^* = 0,6$.

3.9. Из точки D под углом

$$\varphi_1' = \gamma + \varphi_{1\text{ном}} = 7 + 37 = 44^\circ$$

к вертикали CD строим вектор $\vec{DM} = I_{bd}^* = 0,6$. Затем из точки O радиусом OM опишем дугу до пересечения с осью абсцисс в точке N . Полученный отрезок $ON = 1,65$ представляет собой ток возбуждения $I_{b0\text{ном}}^*$, соответствующий основной ЭДС генератора

$$E_0^* = PN = 1,3.$$

3.10. В результате всех выполненных построений определим номинальное изменение напряжения при сбросе нагрузки:

$$\Delta U_{\text{ном}} = (E_0^* - U_{1\text{ном}}^*) / U_{1\text{ном}}^* = (1,3 - 1) / 1 = 0,3 \text{ или } 30 \, \%.$$

Задача 4.5. Трехфазный синхронный генератор явнополюсной конструкции номинальной мощностью $S_{\text{ном}}$ и числом полюсов $2p$ включен на параллельную работу с сетью напряжением U_1 , частотой $f_1 = 50$ Гц. Статор генератора имеет длину l_1 и диаметр D_1 ; магнитная индукция в воздушном зазоре B_δ , коэффициент заполнения сердечника статора сталью $k_c = 0,95$. Фазная обмотка статора содержит w_1 последовательно соединенных витков с обмоточным коэффициентом $k_{\text{об1}} = 0,92$. Фазные обмотки статора соединены «звездой». Синхронные индуктивные сопротивления генератора: по продольной оси x_d , по поперечной оси x_q . Значения перечисленных параметров приведены в табл. 4.4.

Требуется определить тормозные моменты, действующие на ротор генератора: основной $M_{\text{осн}}$, реактивный M_p и результирующий $M = M_{\text{осн}} + M_p$ и построить графики этих моментов в функции угла θ ; вычислить перегрузочную способность генератора, если режим номинальной нагрузки соответствует углу нагрузки $\theta_{\text{ном}} = 16,5^\circ$.

Таблица 4.4

Параметр	Варианты						
	1	2	3	4	5	6	7
$S_{\text{ном}}$, кВ · А	640	400	700	950	630	460	570
U_1 , В	6000	660	6000	6000	6000	660	660
$2p$	12	8	10	16	12	8	10
D_1 , м	0,80	0,92	0,86	1,80	1,0	0,80	1,0
l_1 , м	0,52	0,25	0,35	0,50	0,50	0,30	0,32
B_δ , Тл	0,88	0,78	0,80	0,85	0,78	0,76	0,80
Число витков w_1	420	66	480	450	380	62	58
x_d , Ом	89	1,70	85	62,7	96,5	1,50	0,95
x_q , Ом	41,4	0,78	36,6	21,5	33,6	0,45	0,37

Решение варианта 1.

1. Фазное напряжение генератора

$$U_{1\phi} = 6000/1,73 = 3468 \text{ В.}$$

2. Полюсное деление

$$\tau = \pi D_1 / 2p = 3,14 \cdot 0,80 / 12 = 0,21 \text{ м.}$$

3. Основной магнитный поток

$$\Phi = (2/\pi) B_\delta \tau l_1 k_c = 0,64 \cdot 0,88 \cdot 0,21 \cdot 0,52 \cdot 0,95 = 0,058 \text{ Вб.}$$

4. Основная ЭДС генератора

$$E_0 = 4,44 f_1 \Phi w_1 k_{\text{об1}} = 4,44 \cdot 50 \cdot 0,058 \cdot 420 \cdot 0,92 = 4975 \text{ В.}$$

5. Синхронная угловая скорость вращения

$$\omega_1 = 2\pi f_1/p = 2 \cdot 3,14 \cdot 50/6 = 52,3 \text{ рад/с или } n = 500 \text{ об/мин.}$$

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

$$M_{\text{э.м. макс}} = \frac{m_1 U_{1\phi} E_0}{\omega_1 x_d} = \frac{3 \cdot 3468 \cdot 4975}{52,3 \cdot 89} = 11\,120 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

7. Максимальное значение реактивного момента генератора

$$M_{p \text{ макс}} = \frac{m_1 U_{1\phi}^2}{2\omega_1} \left| \frac{1}{x_d} - \frac{1}{x_q} \right| = \frac{3 \cdot 3468^2}{2 \cdot 52,3} \left(\frac{1}{41,4} - \frac{1}{89} \right) = 4484 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

8. Результаты расчетов основного момента

$$M_{\text{э.м.}} = M_{\text{э.м. макс}} \sin \theta,$$

реактивного момента

$$M_p = M_{p \text{ макс}} \sin 2\theta$$

и результирующего момента

$$M = M_{\text{осн}} + M_p$$

для ряда значений угла нагрузки θ представлены в табл. 4.5.

9. Критическое значение угла нагрузки $\theta_{\text{кр}}$, соответствующее максимальному результирующему моменту,

$$\sin \theta_{\text{кр}} = \sqrt{\beta^2 + 0,5} - \beta = \sqrt{0,25^2 + 0,5} - 0,25 = 0,49; \quad \sin \theta_{\text{кр}} = 0,857,$$

откуда

$$\theta_{\text{кр}} = \arccos 0,49 = 59^\circ,$$

где

$$\beta = E_0/[4 U_{1\phi} (x_d/x_q - 1)] = 4975/[4 \cdot 3468(89/41,4 - 1)] = 0,31.$$

Таблица 4.5

Параметр	Значения параметра					
θ , град.	20	30	45	60	70	90
$\sin \theta$	0,342	0,500	0,707	0,866	0,940	1,00
$M_{\text{осн}}$, Н · м	3803	5560	7861	9629	10 452	11 120
$\sin 2\theta$	0,643	0,866	1,00	0,866	0,643	0,00
M_p , Н · м	2883	3883	4484	3883	2883	0,00
M , Н · м	6686	9443	12 345	13 512	13 335	11 120

Углу $\theta_{кр} = 59^\circ$ соответствуют моменты:

$$M'_{осн} = M_{осн\max} \sin \theta_{кр} = 11\,120 \cdot 0,857 = 9530 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M'_p = M_{p\max} \sin 2\theta_{кр} = 4484 \cdot 0,883 = 3960 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{\max} = M'_{осн} + M'_p = 9530 + 3960 = 13\,490 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

10. По результатам расчетов построены угловые характеристики синхронного явнополюсного генератора (рис. 4.5).

По характеристике результирующего момента $M = f(\theta)$ определяем момент номинального режима при $\theta_{ном} = 16,5^\circ$: $M_{ном} = 5600 \text{ Н} \cdot \text{м}$, следовательно, перегрузочная способность генератора равна $M_{\max}/M_{ном} = 13\,490/5600 = 2,4$.

Задача 4.6. Трехфазный синхронный генератор мощностью $S_{ном}$ работает параллельно с сетью напряжением U_1 в режиме точки с координатами I_{1*} и $I_{в*}$ на U -образной характеристике (рис. 4.6), построенной в относительных единицах.

Требуется определить: силу тока в цепи статора I_1 и его активную и реактивную составляющие; мощность S_r , отдаваемую генератором в сеть, и ее активную и реактивную составляющие; коэффици-

$M, 10^3, \text{Н} \cdot \text{м}$

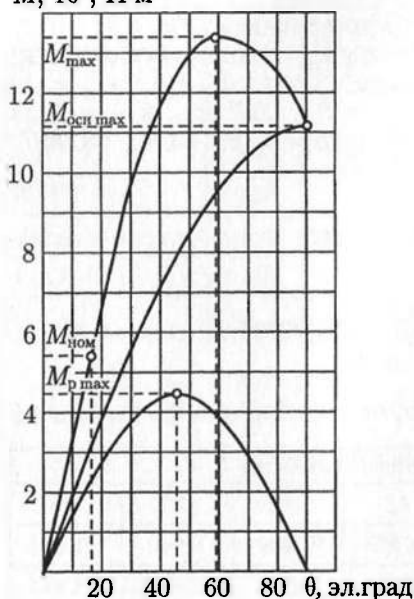


Рис. 4.5. Угловые характеристики синхронного генератора

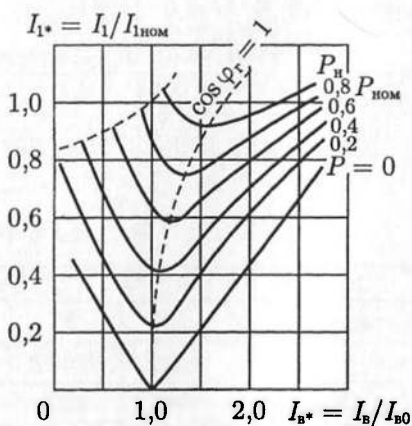


Рис. 4.6. U -образные характеристики трехфазного генератора, включенного на параллельную работу с сетью

Параметр	Варианты					
	1	2	3	4	5	6
$S_{\text{ном}}, \text{кВ} \cdot \text{А}$	500	1000	1300	300	800	2000
$U_c, \text{кВ}$	0,4	6,3	10,5	0,4	6,3	10,5
I_{1*}	0,6	0,8	0,5	0,8	0,88	0,6
$I_{в*}$	1,9	2,0	1,4	1,15	2,0	1,9

коэффициент мощности генератора $\cos \varphi_r$. Необходимые для решения задачи значения параметров приведены в табл. 4.6.

Ответить на вопросы:

а) в каких случаях целесообразна работа синхронного генератора, включенного на параллельную работу с сетью, с перевозбуждением, а в каких — с недовозбуждением?

б) почему с возрастанием активной мощности генератора увеличивается значение тока возбуждения, соответствующее $\cos \varphi_r = 1$?

Решение варианта 1.

1. Номинальный ток статора

$$I_{\text{ном}} = S_{\text{ном}} / (\sqrt{3} U_c) = 500 / (1,73 \cdot 0,4) = 722 \text{ А.}$$

2. Из U -образных характеристик синхронного генератора следует, что в режиме заданной точки с координатами $I_{1*} = 0,6$ и $I_{в*} = 1,9$ работа генератора определяется характеристикой при активной нагрузке $P = 0,2 P_{\text{ном}}$; ток в цепи статора генератора

$$I_1 = 0,6 I_{\text{ном}} = 0,6 \cdot 722 = 433 \text{ А.}$$

3. Активная составляющая тока статора определяется ординатой, соответствующей току возбуждения $I_{в0}$ на характеристике $0,2 P_{\text{ном}}$:

$$I_{1a} = 0,22 I_{\text{ном}} = 0,22 \cdot 722 = 159 \text{ А.}$$

4. Коэффициент мощности генератора

$$\cos \varphi_r = I_{1a} / I_1 = 159 / 433 = 0,367.$$

5. Реактивный (индуктивный) ток генератора, вызванный его перевозбуждением ($I_{в*} = 1,9$),

$$I_{1p} = I_1 \sin \varphi_r = 433 \cdot 0,930 = 403 \text{ А.}$$

6. Полная мощность нагрузки генератора

$$S_r = \sqrt{3} U_c I_1 = 1,73 \cdot 0,4 \cdot 433 = 300 \text{ кВт} \cdot \text{А.}$$

7. Активная составляющая мощности нагрузки генератора

$$P_r = S_r \cos \varphi_r = 300 \cdot 0,367 = 110 \text{ кВт.}$$

8. Реактивная составляющая мощности нагрузки генератора

$$Q_r = S_r \sin \varphi_r = 300 \cdot 0,930 = 279 \text{ квар.}$$

9. Ток возбуждения, соответствующий $\cos \varphi_r = 1$, т.е. току статора $I_1 - I_{1a} = 159 \text{ А}$; по характеристике определяем $I_{B*} = 1,1$.

Задача 4.7. Используя U -образные характеристики синхронно-го генератора (см. рис. 4.6), работающего параллельно с сетью, построить регулировочные характеристики генератора $I_{B*} = f(P_*)$ при неизменном коэффициенте мощности генератора $\cos \varphi_r = \text{const}$, предлагаемые значения которых приведены ниже:

Варианты	1	2	3	4	5	6
$\cos \varphi_r$	0,7	0,75	0,8	0,85	0,9	0,95

Таблица 4.7

P_*	I_{B*}	I_{1*}	Недовозбуждение I_{B*1}	Перевозбуждение I_{B*2}
0,2	0,22	0,31	0,75	1,25
0,4	0,41	0,58	0,53	1,52
0,6	0,58	0,83	0,52	2,2
0,8	0,72	1,02	—	2,8

Решение варианта 1.

1. Коэффициент мощности генератора определяется отношением активной составляющей тока статора, соответствующей коэффициенту мощности $\cos \varphi_r = 1$, к полному току статора:

$$\cos \varphi_r = I_{1a*} / I_{1*},$$

откуда ток статора при заданном значении коэффициента мощности

$$I_{1*} = I_{1a*} / \cos \varphi_r$$

2. Задавшись значениями активной составляющей тока статора

$$I_{1a*} = 0,2; 0,4; 0,6 \text{ и } 0,8,$$

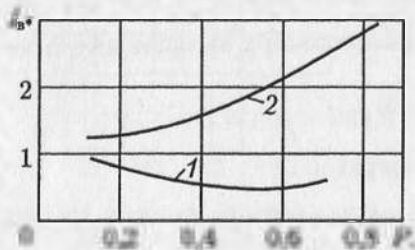


Рис. 4.7. Регулировочные характеристики синхронного генератора

определим соответствующие значения полного тока статора I_{1*} и для каждого из этих значений по U -образным характеристикам определим два значения тока возбуждения I_{B*} — одно для режима недовозбуждения генератора, а другое — для режима перевозбуждения. Все полученные значения заносим в табл. 4.7.

3. По данным табл. 4.7 строим две регулировочные характеристики (рис. 4.7):

$I_{в*1} = f(P_*)$ для режима недовозбуждения (график 1);

$I_{в*2} = f(P_*)$ для режима перевозбуждения (график 2).

Синхронные двигатели и компенсаторы

Задача 4.8. Трехфазный синхронный двигатель серии СДН2 имеет данные каталога: номинальная мощность $P_{ном}$, число полюсов $2p$, КПД $\eta_{ном}$; кратности — пускового тока $I_p / I_{ном}$, пускового момента $M_p / M_{ном}$, максимального синхронного момента $M_{max} / M_{ном}$, асинхронного момента при скольжении $s = 5\%$ (момент входа в синхронизм) $M_5\% / M_{ном}$; соединение обмоток статора «звездой». Значения перечисленных величин приведены в табл. 4.8.

Определить: частоту вращения, номинальный и пусковой токи в цепи статора, номинальный, максимальный синхронный, пусковой моменты и асинхронный момент входа в синхронизм (при $s = 5\%$). Напряжение питающей сети $U_c = 10$ кВ при частоте 50 Гц, коэффициент мощности $\cos \varphi_1 = 0,8$.

Таблица 4.8

Тип двигателя	$P_{ном}$, кВт	$2p$	$\eta_{ном}$, %	$M_{max}/M_{ном}$	$M_5\%/M_{ном}$	$M_p/M_{ном}$	$I_p/I_{ном}$
16-36-12	500	12	93,7	1,9	1,3	1,0	5,2
16-44-12	630	12	94,2	1,9	1,3	1,0	5,1
17-31-12	800	12	94,3	1,9	1,1	1,0	4,7
17-39-12	1000	12	94,9	1,8	1,0	1,0	4,5
17-49-12	1250	12	95,3	1,9	1,2	1,1	5,2
18-64-12	2500	12	96,2	1,8	1,4	1,2	6,5
16-36-10	630	10	94,4	1,8	1,4	0,75	5,0
16-44-10	800	10	94,9	1,8	1,3	0,75	5,0
17-44-10	1250	10	95,5	1,9	1,2	1,1	5,4
17-51-10	1600	10	95,9	1,8	1,2	1,0	5,2

Решение варианта СДН2-16-36-12.

1. Частота вращения

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

2. Потребляемая двигателем мощность в режиме номинальной нагрузки

$$P_{1ном} = P_{ном}/\eta_{ном} = 500/0,937 = 534 \text{ кВт.}$$

3. Ток в цепи статора в режиме номинальной нагрузки

$$I_{1\text{ном}} = P_{1\text{ном}} / (\sqrt{3} U_1 \cos \varphi_1) = 534 / (1,73 \cdot 10 \cdot 0,8) = 39 \text{ А.}$$

4. Пусковой ток в цепи статора

$$I_{\text{п}} = I_{1\text{ном}} (I_{\text{п}} / I_{1\text{ном}}) = 39 \cdot 5,2 = 203 \text{ А.}$$

5. Момент на валу двигателя в режиме номинальной нагрузки

$$M_{\text{ном}} = 9,55 P_{\text{ном}} / n_1 = 9,55 \cdot 500 \cdot 10^3 / 500 = 9550 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

6. Максимальный (синхронный) момент

$$M_{\text{мах}} = M_{\text{ном}} (M_{\text{мах}} / M_{\text{ном}}) = 9550 \cdot 1,9 = 18\,145 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

7. Пусковой момент

$$M_{\text{п}} = M_{\text{ном}} (M_{\text{п}} / M_{\text{ном}}) = 9550 \cdot 1,0 = 9550 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

8. Момент входа в синхронизм (асинхронный момент при скольжении 5 %)

$$M_{5\%} = M_{\text{ном}} (M_{5\%} / M_{\text{ном}}) = 9550 \cdot 1,3 = 12\,415 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Задача 4.9. Для трехфазного синхронного двигателя номинальной мощностью $P_{\text{ном}}$ и напряжением питания U_1 при частоте 50 Гц, с числом полюсов $2p$ (табл. 4.9), пользуясь рабочими характеристиками в относительных единицах (рис. 4.8), 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.

Т а б л и ц а 4.9

Параметр	Варианты							
	1	2	3	4	5	6	7	8
$P_{\text{ном}}$, кВт	132	200	315	630	400	250	500	315
U_1 , кВ	0,38	0,38	6,0	6,0	6,0	0,38	6,0	0,38
$2p$	12	12	8	6	8	10	8	10

Решение варианта 1.

1. Режиму номинальной нагрузки двигателя $P_{2*} = 1$ соответствуют следующие номинальные значения параметров: коэффициент мощности $\cos \varphi_{1\text{ном}} = 0,890$; КПД $\eta_{\text{ном}} = 86\%$. Используя эти величины, определим:

а) номинальный ток статора

$$I_{1\text{ном}} = P_{\text{ном}} / (\sqrt{3} U_1 \eta_{\text{ном}} \cos \varphi_{1\text{ном}}) = 132 / (1,73 \cdot 0,38 \cdot 0,86 \cdot 0,89) = 262 \text{ А;}$$

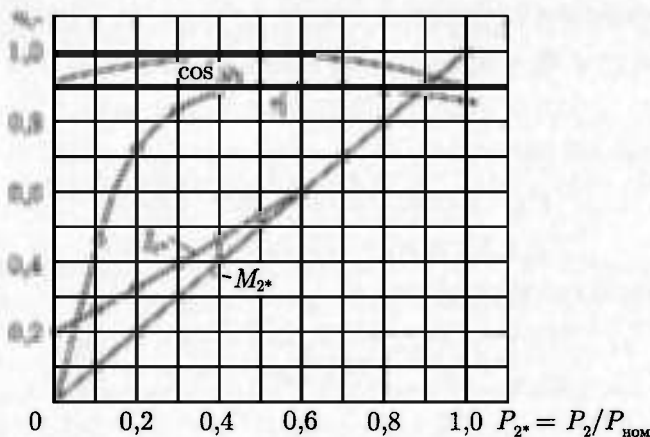


Рис. 4.8. Рабочие характеристики трехфазного синхронного двигателя

б) номинальный момент на валу двигателя

$$M_{2\text{ном}} = 9,55 P_{\text{ном}} / n_1 = 9,55 \cdot 132 \cdot 10^3 / 500 = 2521 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

2. Из рабочих характеристик двигателя следует, что наибольшее значение коэффициента мощности $\cos \varphi_{\text{max}} = 0,980$ соответствует нагрузке $P_{21*} = 0,5$, т.е. полезной мощности двигателя

$$P_{21} = 0,5 P_{\text{ном}} = 0,5 \cdot 132 = 66 \text{ кВт},$$

а наибольшее значение КПД $\eta_{\text{max}} = 0,90$ соответствует нагрузке $P_{22*} = 0,6$, т.е. полезной мощности двигателя

$$P_{22} = 0,6 P_{\text{ном}} = 0,6 \cdot 132 = 79,2 \text{ кВт}.$$

3. Указанным значениям нагрузки соответствуют значения (см. рис. 4.8):

а) токов статора:

$$I_{11} = 0,52 I_{1\text{ном}} = 0,52 \cdot 262 = 136 \text{ А},$$

$$I_{12} = 0,61 I_{1\text{ном}} = 0,61 \cdot 262 = 160 \text{ А};$$

б) полной мощности

$$S_1 = \sqrt{3} U_1 I_{11} = 1,73 \cdot 0,38 \cdot 136 = 89 \text{ кВ} \cdot \text{А},$$

$$S_2 = \sqrt{3} U_1 I_{12} = 1,73 \cdot 0,38 \cdot 160 = 105 \text{ кВ} \cdot \text{А};$$

в) коэффициента мощности

$$\cos \varphi_{11} = \cos \varphi_{\text{max}} = 0,980; \sin \varphi_{11} = 0,199;$$

$$\cos \varphi_{12} = 0,970; \sin \varphi_{12} = 0,242;$$

г) реактивной мощности

$$Q_1 = S_1 \sin \varphi_{11} = 89 \cdot 0,199 = 17,7 \text{ квар},$$

$$Q_2 = S_2 \sin \varphi_{12} = 105 \cdot 0,242 = 25,4 \text{ квар};$$

д) активной потребляемой мощности

$$P_{11} = S_1 \cos \varphi_{11} = 89 \cdot 0,980 = 87 \text{ кВт},$$

$$P_{12} = S_2 \cos \varphi_{12} = 105 \cdot 0,970 = 102 \text{ кВт};$$

е) момента на валу двигателя

$$M_{21} = 0,5 M_{2\text{ном}} = 0,5 \cdot 2521 = 1260 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

$$M_{22} = 0,6 M_{2\text{ном}} = 0,6 \cdot 2521 = 1513 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Задача 4.10. Трехфазный синхронный турбодвигатель ($2p = 2$) имеет технические данные, приведенные в табл. 4 10: номинальная мощность $P_{\text{ном}}$, напряжение (линейное) U_1 при частоте $f_1 = 50$ Гц, КПД $\eta_{\text{ном}}$, коэффициент мощности $\cos \varphi_{1\text{ном}} = 0,9$, синхронное индуктивное сопротивление статора x_s ; обмотка статора соединена «звездой»; активным сопротивлением обмотки статора пренебречь. Требуется рассчитать данные и построить угловую характеристику двигателя и определить его перегрузочную способность.

Таблица 4.10

Параметр	Варианты					
	1	2	3	4	5	6
$P_{\text{ном}}$, кВт	2500	630	800	1250	1600	1000
U_1 , кВ	6,0	6,0	6,0	10,0	10,0	10,0
$\eta_{\text{ном}}$, %	96,4	93,8	94,4	94,8	95,6	95,4
x_s , Ом	7,2	27,0	21,5	39,5	30,0	48,0

Решение варианта 1.

1. Ток статора в режиме номинальной нагрузки

$$I_{1\text{ном}} = P_{\text{ном}} / (\sqrt{3} U_1 \eta_{\text{ном}} \cos \varphi_{1\text{ном}}) = \\ = 2500 / (1,73 \cdot 6,0 \cdot 0,964 \cdot 0,9) = 278 \text{ А}.$$

2. ЭДС реакции якоря неявнополюсного двигателя с учетом индуктивного падения напряжения в фазной обмотке статора

$$E_c = j I_{1\text{ном}} x_s = j 278 \cdot 7,2 = j 2000 \text{ В}.$$

3. ЭДС статора E_0 определим графически путем построения векторной диаграммы напряжений. Учитывая, что построение диаграм-

мы ведется на листе форматом А4, принимаем масштаб напряжений $m_U = 20$ В/мм. Тогда длина вектора фазного напряжения

$$U_{1\phi} = 6000/1,73 = 3468 \text{ В}$$

будет равна 173 мм, а длина вектора ЭДС реакции якоря $E_c = 2000$ В составит 100 мм. Угол сдвига фаз между векторами $U_{1\phi}$ и $I_{1\text{ном}}$ равен

$$\varphi_{1\text{ном}} = \arccos 0,9 = 26^\circ.$$

4. Построение векторной диаграммы (рис. 4.9). Строим вектор напряжения $U_{1\phi}$ и под углом $\varphi_{1\text{ном}} = 26^\circ$ к нему в направлении часовой стрелки вектор тока $I_{1\text{ном}}$ (произвольной длины). Из конца вектора напряжения $U_{1\phi}$ под прямым углом к вектору $I_{1\text{ном}}$ строим вектор ЭДС реакции якоря E_c . Соединив начало вектора E_c с началом диаграммы (точка O), получим вектор основной ЭДС E_0 , длина которого составит 156 мм. С учетом принятого масштаба напряжений $m_U = 20$ В/мм, величина ЭДС E_0 будет равна

$$E_0 = 156 \cdot 20 = 3120 \text{ В}.$$

5. Расчет максимального значения момента турбодвигателя. Так как турбодвигатель является неявнополюсной синхронной машиной, в нем действует лишь основной электромагнитный момент, максимальное значение которого

$$M_{\text{осн max}} = m_1 U_{1\phi} E_0 / (\omega_1 x_c) = 3 \cdot 3468 \cdot 3120 / (314 \cdot 7,2) = 14\,357 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

где синхронная угловая скорость вращения

$$\omega_1 = 2\pi f_1 / p = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 / 1 = 314 \text{ рад/с}.$$

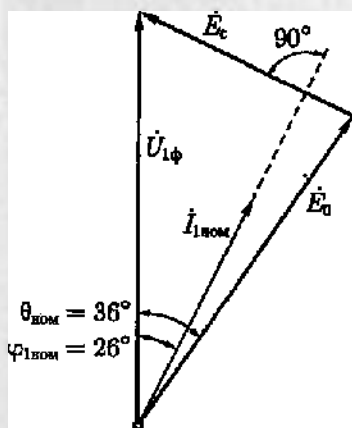


Рис. 4.9. Векторная диаграмма напряжений

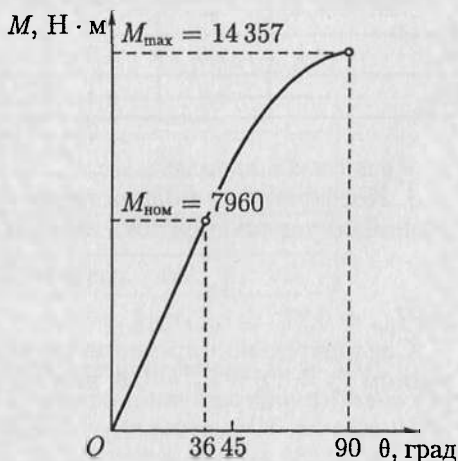


Рис. 4.10. Угловая характеристика синхронного турбодвигателя

6. Строим угловую характеристику турбодвигателя $M_{\text{осн}} = f(\theta)$, которая представляет собой синусоиду (рис. 4.10):

$$M_{\text{осн}} = M_{\text{осн max}} \sin \theta.$$

7. Момент двигателя при номинальной нагрузке

$$M_{\text{ном}} \approx P_{\text{ном}} / \omega_1 = 2500 \cdot 10^3 / 314 = 7960 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

8. Перегрузочная способность двигателя

$$\lambda_{\text{м}} = M_{\text{max}} / M_{\text{ном}} = 14\,357 / 7960 = 1,8.$$

9. Угол номинальной нагрузки двигателя по угловой характеристике

$$\theta_{\text{ном}} = 36^\circ,$$

что соответствует углу $\theta_{\text{ном}}$, полученному при построении векторной диаграммы напряжений (см. рис. 4.9).

Задача 4.11. *U-образные характеристики трехфазных синхронных двигателей, построенные в относительных единицах, представлены на рис. 4.11.*

Требуется определить:

а) коэффициент мощности двигателя $\cos \varphi_1$ при заданных относительных значениях тока возбуждения $I_{\text{в}1*}$ и мощности P_{2*} (табл. 4.11);

б) зависимость тока возбуждения $I_{\text{в}^*}$ от нагрузки двигателя P_{2*} при условии постоянства коэффициента мощности $\cos \varphi_1$; построить график $I_{\text{в}^*} = f(P_{2*})$ при $\cos \varphi_1 = \text{const}$.

Т а б л и ц а 4.11

Параметр	Варианты					
	1	2	3	4	5	6
$I_{\text{в}1*}$	1,6	1,3	1,6	1,0	1,2	1,7
P_{2*}	0,8	0,4	0,4	0,0	0,4	0,8

Р е ш е н и е варианта 1.

1. Коэффициент мощности $\cos \varphi_1$ определяется отношением активной составляющей тока статора I_{1a*} к полному току статора I_{1*} :

$$\cos \varphi_1 = I_{1a*} / I_{1*},$$

где $I_{1a*} = 0,77$.

Следовательно, определив ток статора $I_{1*} = 0,81$ по заданным значениям $I_{\text{в}^*} = 1,6$ и $P_{2*} = 0,8$, вычисляем

$$\cos \varphi_1 = 0,77 / 0,81 = 0,95.$$

2. С помощью *U-образных характеристик* (см. рис. 4.11) определяем соответствующие $\cos \varphi_1 = 0,95$, ток статора I_{1*} и соответствующий ему ток возбуждения $I_{\text{в}^*}$ для разных нагрузок двигателя P_{2*} .

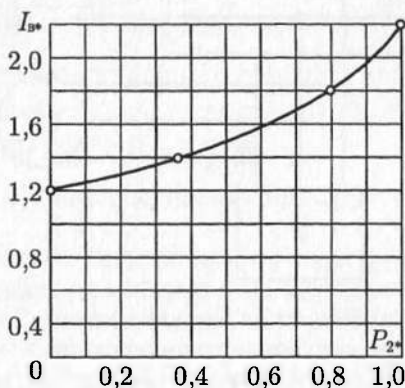
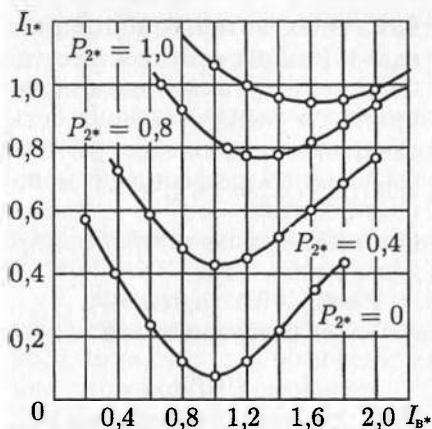


Рис. 4.11. U-образные характеристики синхронного турбомотора

Рис. 4.12. График $I_{в*} = f(P_{2*})$ при $\cos \varphi_1 = 0,95 = \text{const}$

при нагрузке $P_{2*} = 0$

$$I_{1a*} = 0,080; I_{1*} = I_{1a*} / \cos \varphi_1 = 0,080 / 0,95 = 0,084; I_{в*} = 1,1;$$

при нагрузке $P_{2*} = 0,4$

$$I_{1a*} = 0,42; I_{1*} = I_{1a*} / \cos \varphi_1 = 0,42 / 0,95 = 0,44; I_{в*} = 1,2;$$

при нагрузке $P_{2*} = 1,0$

$$I_{1a*} = 0,93; I_{1*} = I_{1a*} / \cos \varphi_1 = 0,93 / 0,95 = 0,98; I_{в*} = 2,0.$$

Результаты расчета заносим в табл. 4.12.

3. По данным табл. 4.12 строим график $I_{в*} = f(P_{2*})$ при $\cos \varphi_1 = 0,95 = \text{const}$ (рис. 4.12).

Таблица 4.12

Параметр	Значения параметра			
P_{2*}	0,0	0,4	0,8	1,0
I_{1a*}	0,080	0,42	0,77	0,93
I_{1*}	0,084	0,44	0,81	0,98
$I_{в*}$	1,1	1,2	1,6	2,0

Задача 4.12. В трехфазную сеть напряжением U_c включен потребитель Z мощностью $S_{\text{потр}}$ при коэффициенте мощности $\cos \varphi$. Определить мощность $Q_{ск}$ синхронного компенсатора СК, который следует подключить параллельно потребителю (рис. 4.13), чтобы коэффициент мощности в сети повысился до значения $\cos \varphi'_1 = 0,95$. На сколько при этом уменьшатся потери энергии в сети, если вели-

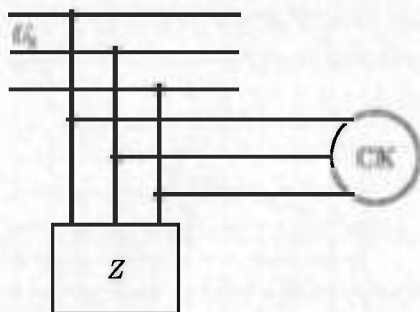


Рис. 4.13. Схема включения синхронного компенсатора

чина этих потерь пропорциональна квадрату тока в этой сети. Определить также, насколько придется увеличить мощность синхронного компенсатора, чтобы повысить коэффициент мощности сети до $\cos \varphi' = 1$. Значения заданных параметров приведены в табл. 4.13.

Решение варианта 1.

1. Ток нагрузки в сети

$$I_n = S / (\sqrt{3} U_c) = 1600 / (1,73 \cdot 6,0) = 154 \text{ А.}$$

2. Активная составляющая этого тока

$$I_{c.a} = I_c \cos \varphi = 154 \cdot 0,70 = 108 \text{ А.}$$

3. Реактивная мощность сети до подключения синхронного компенсатора

$$Q = S \cdot \sin \varphi = 1600 \cdot 0,70 = 1120 \text{ квар.}$$

4. Реактивная мощность сети после подключения синхронного компенсатора

$$Q' = S \cdot \sin \varphi'_1 = 1600 \cdot 0,312 = 499 \text{ квар.}$$

5. Для повышения коэффициента мощности до $\cos \varphi'_1 = 0,95$ требуется включение параллельно нагрузке Z синхронного компенсатора реактивной мощностью

$$Q_{ск} = Q - Q' = 1120 - 499 = 621 \text{ квар.}$$

6. При включении синхронного компенсатора активная составляющая тока в сети не изменится ($I_{c.a} = 108 \text{ А}$), а реактивная составляющая тока в сети станет равной

$$I'_{c.p} = Q' / (\sqrt{3} U_c) = 499 / (1,73 \cdot 6,0) = 48 \text{ А.}$$

Таблица 4.13

Параметр	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
U_c , кВ	6,0	10,0	20,0	35,0	6,0	10,0	20,0	35,0	6,0	10,0
S , МВ · А	1,6	4,5	1,8	2,4	0,8	1,7	1,5	3,5	2,0	3,5
$\cos \varphi$	0,70	0,72	0,70	0,75'	0,70	0,72	0,75	0,74	0,78	0,72

7. Ток в сети после подключения синхронного компенсатора

$$I'_c = \sqrt{I_{c2}^2 + I_{c3}^2} = \sqrt{108^2 + 48^2} = 118 \text{ А.}$$

8. Потери в сети после подключения синхронного компенсатора составят

$$\Delta P'_c = (I'_c/I_c)^2 100 = (118/154)^2 100 = 0,59 \%$$

от их значения до подключения синхронного компенсатора ΔP , т. е. потери в сети уменьшатся на 41 %.

9. При увеличении коэффициента мощности сети до $\cos \varphi' = 1$ требуемая для этого реактивная мощность синхронного компенсатора была бы равна всей реактивной мощности сети до подключения синхронного компенсатора (см. п. 3), т. е. $Q_{ск} = Q = 1120$ квар. Следовательно, потребовался бы синхронный компенсатор мощностью в $(1120/621) = 1,8$ раза больше мощности СК, примененного в схеме повышения коэффициента мощности до $\cos \varphi'_1 = 0,95$. Это привело бы к росту капитальных затрат на создание рассматриваемой электрической установки и сделало бы нерентабельным применение синхронного компенсатора для повышения коэффициента мощности сети до единицы.

КОЛЛЕКТОРНЫЕ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

5.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

Отличительным признаком коллекторной машины постоянного тока является наличие в ней щеточно-коллекторного узла — механического преобразователя. Через коллектор и щетки осуществляется связь рабочей обмотки (обмотки якоря) с электрической нагрузкой, если машина является генератором, или с источником питания, если машина является двигателем.

Рабочая обмотка расположена на вращающейся части машины — якоре, и называется обмоткой якоря. Эта обмотка состоит из секций, определенным образом уложенных на сердечнике якоря и присоединенных к коллектору.

Обмотка якоря представляет собой замкнутую систему проводников и она, как правило, делается двухслойной. Секции обмотки могут быть одновитковыми или многовитковыми. Обмотки якоря могут быть волновыми и петлевыми, простыми, сложными и комбинированными.

Для выравнивания ЭДС параллельных ветвей обмотки или выравнивания ЭДС простых обмоток, составляющих сложную, в обмотках применяют уравнивательные соединения.

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

$$E_a = c_e \Phi n,$$

где c_e — коэффициент, определяемый конструкцией обмотки якоря: числом пар полюсов p , количеством пазовых сторон (проводников) N , составляющих обмотку, и числом параллельных ветвей в обмотке a

$$c_e = pN/(60a).$$

Электромагнитный момент M , возникающий на якоре при прохождении тока I_a по обмотке якоря, $H \cdot м$,

$$M = c_m \Phi I_a$$

где c_m — коэффициент, определяемый конструкцией обмотки якоря,

$$c_m = pN/(2\pi a).$$

Основной магнитный поток машины постоянного тока определяется выражением, Вб,

$$\Phi = B_{\delta} l_i \tau \alpha_i$$

где B_{δ} — магнитная индукция в воздушном зазоре машины, Тл; l_i — расчетная длина сердечника якоря, м; τ — полюсное деление, м; $\alpha_i = 0,6 - 0,8$ — коэффициент полюсного перекрытия.

Электромагнитный момент машины постоянного тока M прямо пропорционален электромагнитной мощности $P_{\text{эм}} = E_a I_a$ и обратно пропорционален частоте вращения якоря n

$$M = 9,55 P_{\text{эм}} / n$$

Важным процессом, влияющим на рабочие свойства машины постоянного тока, является *реакция якоря*. В результате влияния этого процесса происходит искажение магнитного поля в воздушном зазоре и зубцовом слое якоря машины и ее размагничивание. Для ослабления нежелательного воздействия реакции якоря в машинах постоянного тока применяют добавочные полюсы, а в машинах значительной мощности — еще и компенсационную обмотку.

Размагничивающее влияние реакции якоря по поперечной оси приходится учитывать. Обычно это делают посредством коэффициента реакции якоря $k_{p,я}$, который используют при расчете МДС, компенсирующей влияние реакции якоря по поперечной оси

$$F_{\text{я}} = k_{p,я} F_a$$

где F_a — МДС обмотки якоря на пару полюсов, А,

$$F_a = NI_a / (4ap).$$

Для определения коэффициента реакции якоря пользуются графиком $k_{p,я} = f(F_a / F_{\text{в0}})$ (рис. 5.1), где нижняя граница графика соответствует магнитной индукции в зубцах сердечника якоря $B_z = 1,7$ Тл, а верхняя — $B_z = 2,3$ Тл.

Величина $F_{\text{в0}}$ представляет собой МДС обмотки возбуждения в режиме холостого хода, А,

$$F_{\text{в0}} = 2 F_{\delta} k_{\mu}$$

где F_{δ} — магнитное напряжение воздушного зазора, А, $F_{\delta} = 0,8 \times \times B_{\delta} \delta k_{\delta} 10^3$; $k_{\mu} = 1,2 - 1,7$ — коэффициент магнитного насыщения магнитной цепи машины; B_{δ} — магнитная индукция в воздушном зазоре машины, Тл; k_{δ} — коэффициент воздушного зазора, учитывает увеличение воздушного зазора, вызванное зубчатой поверхностью якоря.

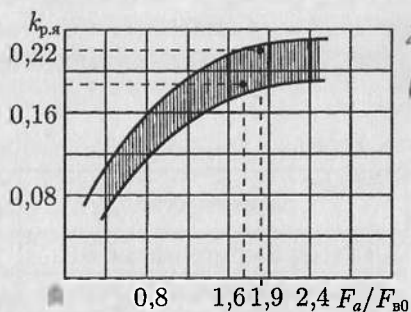


Рис. 5.1. График $k_{p,я} = f(F_a / F_{\text{в0}})$

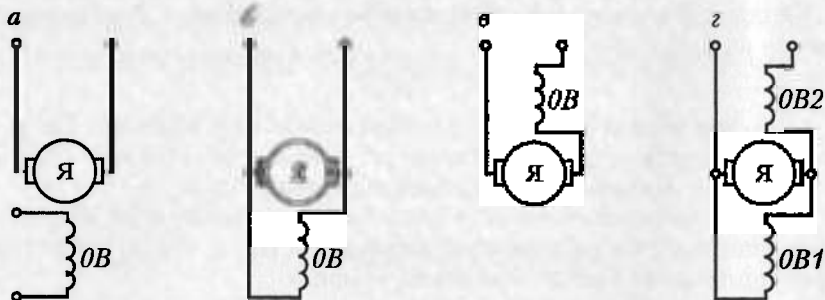


Рис. 5.2. Способы возбуждения машин постоянного тока:
а — независимое; *б* — параллельное; *в* — последовательное; *г* — смешанное

Основной магнитный поток, возбуждающий машину постоянного тока, создается обмоткой возбуждения. В зависимости от способа включения этой обмотки относительно обмотки якоря, машины постоянного тока разделяются на машины независимого, параллельного, последовательного и смешанного возбуждения (рис. 5.2). Способ возбуждения в значительной степени влияет на свойства генераторов и двигателей постоянного тока.

Для генераторов постоянного тока справедливо уравнение напряжений

$$U = E_a - I_a \sum r - \Delta U_{\text{щ}},$$

где $\sum r$ — сумма сопротивлений в цепи обмотки якоря: собственно обмотки якоря, обмотки добавочных полюсов и т.д.; $\Delta U_{\text{щ}}$ — падение напряжения в щеточном контакте на пару щеток, зависит от марки примененных в машине щеток (табл. 5.1).

При оценке свойств генераторов постоянного тока используется понятие номинального изменения напряжения на выходе генератора при сбросе нагрузки:

$$\Delta U_{\text{ном}} = \frac{U_0 - U_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}} 100,$$

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

Таблица 5.1

Марка щеток	Переходное падение напряжения на пару щеток $\Delta U_{\text{щ}}$, В, при номинальном токе $I_{\text{а ном}}$
Электрографитированные ЭГ	2,0–2,7
Угольно-графитовые УГ, Т	2,0
Медно-графитовые М, МГ	0,2–1,5

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

Для двигателей постоянного тока уравнение напряжений имеет вид:

$$U = E_a + I_a \sum r + \Delta U_{\text{щ}},$$

т.е. ЭДС E_a , индуцируемая в обмотке якоря, меньше подводимого напряжения U на величину внутреннего падения напряжения в цепи якоря $I_a \sum r$. Отсюда ток якоря

$$I_a = (U - E_a) / \sum r.$$

Электромагнитный момент двигателя постоянного тока, Н · м,

$$M = c_m \Phi I_a = 9,55 P_{\text{эм}} / n.$$

Момент на валу двигателя, т.е. полезный момент,

$$M_2 = M - M_0 = 9,55 P_2 / n,$$

где M_0 — момент холостого хода; P_2 — полезная мощность двигателя,

$$P_2 = P_1 \eta,$$

η — КПД двигателя.

Частота вращения якоря двигателя постоянного тока, об/мин,

$$n = \frac{U - I_a \sum r}{c_e \Phi}.$$

Коэффициент полезного действия машины постоянного тока

$$\eta = P_2 / P_1 = 1 - \frac{\sum P}{P_2 + \sum P},$$

где $\sum P$ — суммарные потери в машине.

При оценке регулировочных свойств двигателей постоянного тока наибольшее значение имеют механические характеристики $n = f(M)$. Важными показателями этих характеристик являются их жесткость и линейность.

Жесткость механической характеристики определяется углом наклона характеристики к оси ординат: чем меньше этот угол, тем менее жесткой (более мягкой) является эта характеристика.

У двигателей независимого (параллельного) возбуждения механические характеристики прямолинейны. Наиболее жесткой является естественная механическая характеристика, ее наклон к оси ординат лишь немногим меньше 90° . Для получения более мягких механических характеристик обычно в цепь якоря последовательно

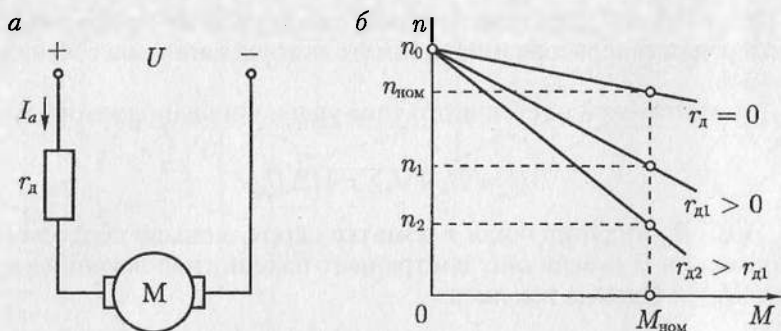


Рис. 5.3. Схема включения (а) и механические характеристики (б) двигателя постоянного тока независимого возбуждения

включают резистор, создающий в этой цепи добавочное сопротивление r_d ; с увеличением r_d механические характеристики становятся «мягче», при этом характеристики остаются прямолинейными (рис. 5.3). При неизменном моменте нагрузки на валу двигателя с увеличением сопротивления резистора r_d частота вращения уменьшается. Сопротивление резистора r_d для получения искусственной механической характеристики, соответствующей требуемой частоте вращения n при заданной нагрузке (обычно номинальной) в двигателях независимого (параллельного) возбуждения, рассчитывают по формуле:

$$r_d = (U/I_a)[1 - (n/n_{00})] - \Sigma r,$$

где U — напряжение питания цепи якоря двигателя, В; I_a — ток якоря, соответствующий заданной нагрузке двигателя, А; n — требуемая частота вращения, об/мин; n_{00} — частота вращения идеального холостого хода, об/мин.

Частота идеального холостого хода n_{00} представляет собой пороговую частоту вращения, при превышении которой двигатель переходит в генераторный режим. Эта частота вращения превышает номинальную частоту вращения $n_{ном}$ настолько, насколько номинальное напряжение, подводимое к цепи якоря $U_{ном}$, превышает ЭДС двигателя $E_{а ном}$:

$$n_{00} = n_{ном} (U_{ном}/E_{а ном}).$$

Наиболее ответственным является процесс пуска двигателя постоянного тока. Так, начальный пусковой ток двигателя при непосредственном его включении в сеть может достигать опасных для двигателя значений, нарушающих работу щеточно-коллекторного узла и способного вызвать «круговой огонь» на коллекторе. Кроме того, такой ток создает чрезмерно большой пусковой момент, оказывающий на вращающиеся части электропривода ударное воздействие, способное механически разрушить их.

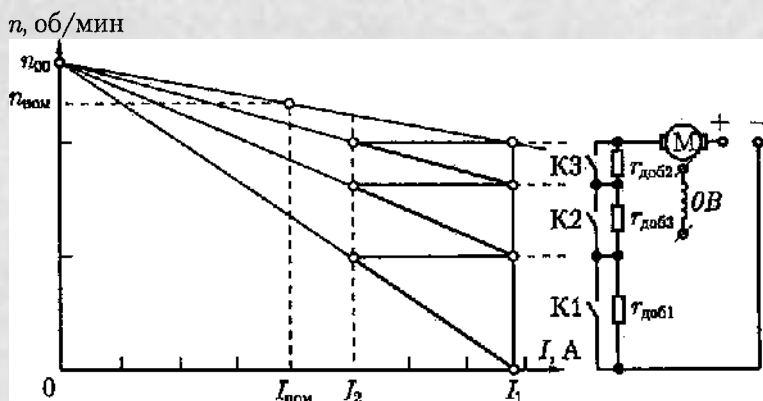


Рис. 5.4. Пусковая диаграмма двигателя постоянного тока с трехступенчатым пусковым реостатом

В связи с этим большое практическое значение имеет решение задач по *расчету пусковых реостатов* двигателей постоянного тока. Применяют два метода расчета пусковых реостатов: *графический* и *аналитический*. В основе графического метода лежит пусковая диаграмма двигателя. В представленной на рис. 5.4 пусковой диаграмме с применением трехступенчатого пускового реостата K1, K2 и K3 являются контактами силовых контакторов, посредством которых осуществляется переключение ступеней реостата, а $r_{доб1}$, $r_{доб2}$ и $r_{доб3}$ — резисторы ступеней пускового реостата.

Значения начального пускового тока I_1 и тока переключений I_2 обычно принимают:

$$I_1 = (1,5 \dots 2,5) I_{\text{аном}}; I_2 = (1,0 \dots 1,3) I_{\text{аном}}.$$

При этом ток переключений I_2 должен быть не меньше тока нагрузки, соответствующего статическому моменту сопротивления M_c , создаваемому нагрузкой на двигатель. Для некоторых двигателей специального назначения, предназначенных для тяжелых условий работы, например двигателей краново-металлургических серий, указанные значения токов могут быть увеличены.

Расчет сопротивлений резисторов пускового реостата ведут по формулам:

$$r_{д3} = \sum r(\lambda - 1); r_{д2} = r_{д3} \lambda; r_{д1} = r_{д2} \lambda.$$

В этих выражениях λ представляет собой отношение начального пускового тока I_1 к току переключений I_2

$$\lambda = I_1 / I_2.$$

Отличительным признаком двигателей *последовательного* возбуждения является то, что ток возбуждения одновременно являет-

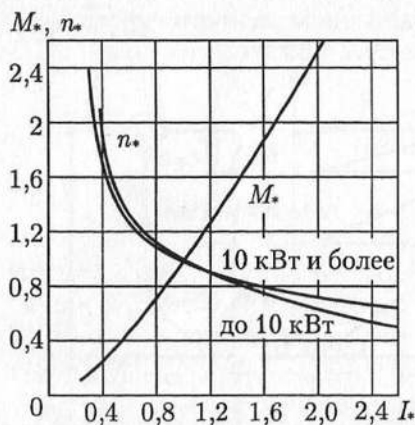


Рис. 5.5. Универсальные естественные характеристики двигателей постоянного тока последовательного возбуждения краново-металлургических серий МП, ДП и Д

ной, и ее жесткость на разных ее участках неодинакова: при малых нагрузках частота вращения двигателя значительна и характеристика мягкая, с увеличением нагрузки характеристика становится более жесткой, частота вращения уменьшается, а при нагрузке, близкой к номинальной, характеристика становится еще более жесткой. Объясняется это тем, что при такой нагрузке магнитная система насыщена и величина магнитного потока становится практически не зависящей от величины тока нагрузки.

В связи с отсутствием уравнений, позволяющих рассчитать и построить механические характеристики двигателя последовательного возбуждения, для их построения пользуются *универсальными естественными характеристиками* (рис. 5.5), приводимыми в каталогах на двигатели постоянного тока последовательного возбуждения.

Универсальные естественные характеристики построены в относительных единицах: тока $I_* = I_a / I_{a\text{ном}}$; момента $M_* = M / M_{\text{ном}}$; частоты вращения $n = n / n_{\text{ном}}$.

Для построения естественной механической характеристики $n = f(M)$ двигателя последовательного возбуждения по универсальным характеристикам поступают следующим образом.

Задаются рядом относительных значений тока нагрузки I_* и по рис. 5.5 определяют соответствующие относительные значения момента M_* и частоты вращения n_* . Затем, используя номинальные значения тока якоря, момента и частоты вращения, определяют именованные значения тока I_a (А), момента M (Н · м) и частоты враще-

ся и током нагрузки. По этой причине магнитный поток возбуждения в двигателе последовательного возбуждения зависит от нагрузки.

При небольшой нагрузке двигателя его магнитная система не насыщена и магнитный поток пропорционален току нагрузки

$$\Phi = c_\Phi I_a,$$

а вращающий момент двигателя равен

$$M = c_m \Phi I_a = c_m c_\Phi I_a^2.$$

С ростом нагрузки магнитная система двигателя насыщается, при этом зависимость $M = f(I_a)$ становится нелинейной. Механическая характеристика двигателя $n = f(M)$ будет также нелиней-

ния n (об/мин). По полученным значениям величин строят естественную механическую характеристику двигателя $n = f(M)$.

5.2. ЗАДАЧИ

Обмотка якоря, ЭДС, реакция якоря

Задача 5.1. Обмотка якоря машины постоянного тока содержит элементарных пазов $Z_{эл}$ при числе полюсов $2p$. По данным, приведенным в табл. 5.2, рассчитать параметры и начертить развернутую схему простой волновой (ПВ) либо простой петлевой (ПП) обмотки якоря. На схеме обозначить полюсы, расставить щетки и, задавшись направлением вращения якоря, определить полярность щеток в генераторном режиме работы машины. Выполнить схему параллельных ветвей обмотки якоря и определить ее общее сопротивление, считая при этом сопротивление одной секции равным $r_c = 0,02$ Ом (секции одновитковые).

Таблица 5.2

Параметр	Варианты для типов обмоток									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	ПВ	ПВ	ПВ	ПП	ПВ	ПП	ПВ	ПП	ПВ	ПП
$Z_{эл}$	17	25	33	32	23	24	29	30	27	28
$2p$	4	6	8	4	4	8	4	6	4	6

Решение варианта 1 (обмотка простая волновая).

1. Шаг обмотки по коллектору (обмотка левоходовая)

$$y_k = y = (K - 1)/p = (17 - 1)/2 = 8 \text{ делений.}$$

2. Первый шаг обмотки по пазам

$$y_1 = (Z_{\phi}/2p) \pm \varepsilon = (17/4) - 0,25 = 4 \text{ паза.}$$

3. Развернутая схема обмотки (рис. 5.6). На листе форматом А4 размечаем 17 пазов, в каждом из которых изображаем активную сторону верхнего слоя (сплошная линия) и активную сторону нижнего слоя (пунктирная линия) и 17 коллекторных делений.

4. Первый обход по якорю и коллектору начинаем с коллекторно-го деления 1 и укладываем секции 1 и 9, активные стороны которых располагаются в пазах 1, 5, 9 и 13. Конец секции 9 присоединяем к коллекторному делению 17, расположенному рядом (слева) с делением 1. Затем делаем второй обход и укладываем секции 17 и 8, которую присоединяем к коллекторному делению 16, т. е. смещаемся еще на одно коллекторное деление влево. Затем делаем третий об-

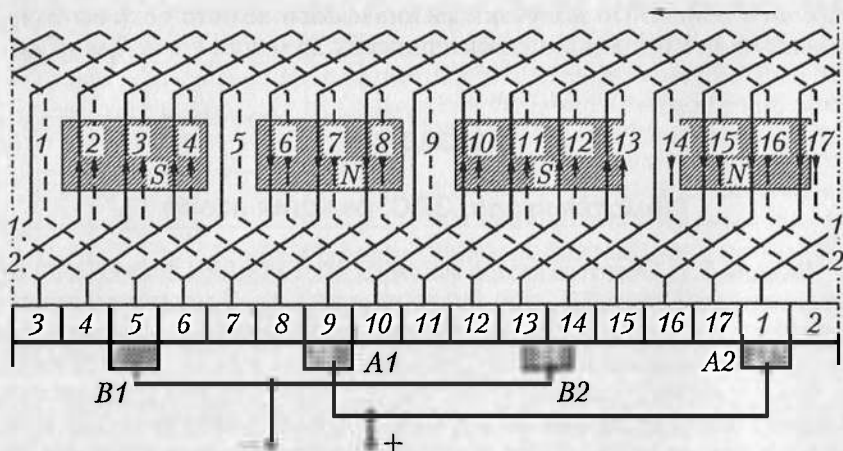


Рис. 5.6. Развернутая схема простой волновой обмотки якоря:
 $2p = 4$; $Z = 17$; $y_1 = 4$ паза

ход и т. д., пока обмотка не замкнется, при этом последнюю по обходу секцию 10 присоединяем к секции 1 и коллекторному делению 1.

Затем размечаем четыре полюса с чередующейся полярностью и располагаем на коллекторе щетки, размещая их по геометрической нейтральной.

Задаввшись направлением вращения якоря, определяем направление ЭДС в секциях обмотки, считая, что полюсы «расположены» над обмоткой.

Затем выполняем схему параллельных ветвей (рис. 5.7). При положении коллектора относительно щеток, показанном на рис. 5.6, секция 1 замкнута накоротко щетками A1 и A2, а секции 5 и 14 замкнуты накоротко щетками B1 и B2. Остальные секции расположились в двух параллельных ветвях по семь секций в каждой ветви. Сопротивление обмотки постоянному току, замеренное между клеммами «плюс» и «минус», составляет

$$r_a = (r_c \cdot 7) / 2 = (0,02 \cdot 7) / 2 = 0,07 \text{ Ом.}$$

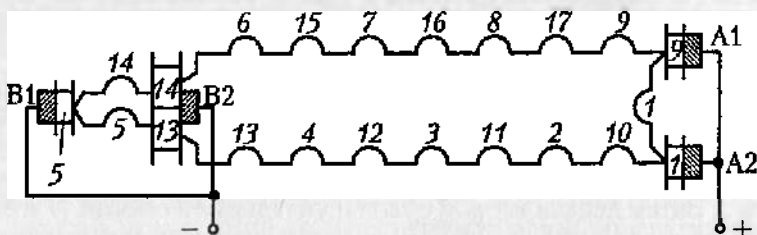


Рис. 5.7. Схема параллельных ветвей простой волновой обмотки (см. рис. 5.6)

Задача 5.2. Обмотка якоря машины постоянного тока состоит из N активных сторон при числе полюсов $2p = 4$, основной магнитный поток Φ , ЭДС обмотки якоря E_a при коэффициенте c_e , частота вращения якоря n . Используя данные табл. 5.3, определить недостающие параметры.

Таблица 5.3

Параметр	Варианты для типов обмоток				
	1	2	3	4	5
	ПВ	ПП	ПВ	ПВ	ПП
n , об/мин	1500	1200	—	—	1500
N	500	—		120	240
c_e	—	12	20	—	—
E_a , В	—	—	400	200	120
Φ , Вб	0,008	0,14	0,020	0,025	—

Решение варианта 1 (обмотка простая волновая, $2a = 2$).
ЭДС обмотки якоря

$$E_a = c_e \Phi n = 16,6 \cdot 0,008 \cdot 1500 = 200 \text{ В},$$

где

$$c_e = pN/(60a) = 2 \cdot 500/(60 \cdot 1) = 16,6.$$

Задача 5.3. Двигатель постоянного тока параллельного возбуждения номинальной мощностью $P_{\text{ном}}$ включен в сеть с напряжением U_c ; КПД двигателя $\eta_{\text{ном}}$, обмотка якоря простая волновая ($2a = 2$), с числом полюсов $2p = 4$, число активных проводников в обмотке N ; ток в обмотке возбуждения $I_B = 0,02 I_{a\text{ном}}$, величина одностороннего воздушного зазора δ , магнитная индукция в зазоре B_δ , магнитная индукция в зубцах якоря B_z , коэффициент воздушного зазора $k_\delta = 1,3$, коэффициент магнитного насыщения магнитопровода двигателя $k_\delta = 1,35$. Значения перечисленных параметров приведены в табл. 5.4.

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

Решение варианта 1.

1. Ток, потребляемый двигателем в номинальном режиме,

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

2. Ток в обмотке возбуждения

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

Параметр	Варианты						
	1	2	3	4	5	6	7
$P_{\text{ном}}$, кВт	100	120	85	30	45	90	75
U_c , В	440	440	220	220	440	440	220
$\eta_{\text{ном}}$, %	89	90	87	85	85	87	86
N	280	300	150	120	260	240	120
δ , мм	2,0	2,0	1,8	1,8	1,6	1,8	1,6
B_z , Тл	2,2	2,3	1,8	1,9	1,7	1,9	2,0
B_δ , Тл	0,82	0,85	0,80	0,83	0,80	0,83	0,82

3. Ток в цепи якоря при номинальной нагрузке

$$I_{\text{аном}} = 255 - 5 = 250 \text{ А.}$$

4. Магнитное напряжение воздушного зазора

$$F_\delta = 0,8 B_\delta \delta k_\delta 10^3 = 0,8 \cdot 0,82 \cdot 2,0 \cdot 1,3 \cdot 10^3 = 1700 \text{ А.}$$

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

$$F_{\text{в0}} = 2 F_\delta k_\mu = 2 \cdot 1700 \cdot 1,35 = 4590 \text{ А.}$$

6. МДС якоря на пару полюсов в режиме номинальной нагрузки

$$F_{\text{аном}} = N I_{\text{аном}} / (4 a p) = 280 \cdot 250 / (4 \cdot 1 \cdot 2) = 8750 \text{ А.}$$

7. Коэффициент реакции якоря по поперечной оси (см. рис. 5.1); при $B_z = 2,2$ Тл (верхняя граница графика) и $F_a / F_{\text{в0}} = 8750 / 4590 = 1,9$ коэффициент $k_{\text{р.я}} = 0,22$.

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

$$F_{\text{qd}} = k_{\text{р.я}} F_{\text{аном}} = 0,22 \cdot 8750 = 1925 \text{ А.}$$

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

$$F_{\text{в.ном}} = F_{\text{в0}} + F_{\text{qd}} = 4590 + 1925 = 6515 \text{ А.}$$

10. Число витков в полюсной катушке обмотки возбуждения

$$w_{\text{к.в}} = F_{\text{в.ном}} / (2 I_{\text{в}}) = 6515 / (2 \cdot 5) = 651 \text{ виток.}$$

Задача 5.4. Генератор постоянного тока независимого возбуждения с номинальным напряжением $U_{\text{ном}}$ и номинальной частотой

Параметр	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$U_{\text{ном}}, \text{В}$	230	230	460	460	460	115	460	230	230	230
$n_{\text{ном}}, \text{об/мин}$	1500	2300	3000	2300	1500	1000	2300	1000	3000	2300
$\sum r, \text{Ом}$	0,175	0,08	0,17	0,3	0,7	0,09	0,27	0,25	0,08	0,14
N	100	118	280	240	200	80	270	114	100	138
$\Phi, 10^{-2}, \text{Вб}$	4,8	2,6	1,7	2,6	4,8	4,5	2,4	6,1	2,4	2,3

вращения $n_{\text{ном}}$ имеет на якоре простую волновую обмотку, состоящую из N проводников. Число полюсов генератора $2p = 4$, сопротивление обмоток в цепи якоря при рабочей температуре $\sum r$, щетки угольно-графитовые $\Delta U_{\text{щ}} = 2 \text{ В}$, основной магнитный поток Φ . Значения перечисленных параметров приведены в табл. 5.5. Требуется определить для номинального режима работы генератора: ЭДС якоря E_a , ток нагрузки $I_{\text{ном}}$ (размагничивающим влиянием реакции якоря пренебречь), полезную мощность $P_{\text{ном}}$, электромагнитную мощность $P_{\text{эм}}$ и электромагнитный момент $M_{\text{ном}}$.

Решение варианта 1.

1. ЭДС якоря генератора при номинальной частоте вращения

$$E_{a\text{ном}} = c_e \Phi n_{\text{ном}} = 3,33 \cdot 4,8 \cdot 10^{-2} \cdot 1500 = 240 \text{ В},$$

где

$$c_e = pN/(60a) = 2 \cdot 100/(60 \cdot 1) = 3,33;$$

число пар параллельных ветвей простой волновой обмотки $a = 1$.

2. Ток якоря в номинальном режиме можно определить, воспользовавшись уравнением напряжений для генератора

$$U = E_a - I_a \sum r - \Delta U_{\text{щ}},$$

откуда ток якоря в номинальном режиме

$$I_{a\text{ном}} = (E_{a\text{ном}} - U_{\text{ном}} - \Delta U_{\text{щ}})/\sum r = (240 - 230 - 2)/0,175 = 45,7 \text{ А}.$$

3. Полезная (номинальная) мощность генератора

$$P_{\text{ном}} = U_{\text{ном}} I_{a\text{ном}} = 230 \cdot 45,7 = 10\,511 \text{ Вт или } 10,51 \text{ кВт}.$$

4. Электромагнитная мощность генератора

$$P_{\text{эм}} = E_{a\text{ном}} I_{a\text{ном}} = 240 \cdot 45,7 = 10\,968 \text{ Вт или } 10,97 \text{ кВт}.$$

5. Электромагнитный момент в номинальном режиме

$$M_{\text{ном}} = 9,55 P_{\text{эм}}/n_{\text{ном}} = 9,55 \cdot 10\,968/1500 = 69,8 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Генераторы постоянного тока

Задача 5.5. Генератор постоянного тока независимого возбуждения мощностью $P_{\text{ном}}$ и напряжением $U_{\text{ном}}$ имеет сопротивление обмоток в цепи якоря, приведенное к рабочей температуре, Σr ; в генераторе применены электрографитированные щетки марки ЭГ ($\Delta U_{\text{щ}} = 2,5$ В). Определить номинальное изменение напряжения при сбросе нагрузки. Значения параметров приведены в табл. 5.6.

Таблица 5.6

Параметр	Варианты						
	1	2	3	4	5	6	7
$P_{\text{ном}}, \text{кВт}$	20	45	15	90	80	30	18
$U_{\text{ном}}, \text{В}$	230	460	230	460	460	230	230
$\Sigma r, \text{Ом}$	0,12	0,22	0,15	0,12	0,11	0,08	0,13

Решение варианта 1.

1. Ток в номинальном режиме

$$I_{\text{аном}} = P_{\text{ном}} / U_{\text{ном}} = 20 \cdot 10^3 / 230 = 87 \text{ А.}$$

2. ЭДС генератора

$$E_a = U_0 = U_{\text{ном}} + I_{\text{аном}} \Sigma r + \Delta U_{\text{щ}} = 230 + 87 \cdot 0,12 + 2,5 = 243 \text{ В.}$$

3. Номинальное изменение напряжения при сбросе нагрузки

$$\Delta U_{\text{ном}} = \frac{U_0 - U_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}} 100 = \frac{243 - 230}{230} 100 = 5,65 \text{ \%}.$$

Задача 5.6. Генератор постоянного тока параллельного возбуждения имеет номинальные данные: мощность $P_{\text{ном}}$, напряжение $U_{\text{ном}}$, частота вращения $n_{\text{ном}}$, сопротивление обмоток в цепи якоря, приведенное к рабочей температуре, Σr , падение напряжения в щеточном контакте пары щеток $\Delta U_{\text{щ}} = 2$ В, сопротивление цепи обмотки возбуждения $r_{\text{в}}$, КПД в номинальном режиме $\eta_{\text{ном}}$, ток генератора $I_{\text{ном}}$, ток в цепи возбуждения $I_{\text{в}}$, ток в цепи якоря $I_{\text{аном}}$, ЭДС якоря $E_{\text{аном}}$, электромагнитная мощность $P_{\text{эм}}$, электромагнитный момент при номинальной нагрузке $M_{\text{ном}}$, мощность приводного двигателя $P_{\text{Iном}}$.

Значения перечисленных параметров приведены в табл. 5.7. Требуется определить значения параметров, не указанных в таблице.

Решение варианта 1.

1. Номинальный ток на выходе генератора

$$I_{\text{ном}} = P_{\text{ном}} / U_{\text{ном}} = 10\,000 / 230 = 43,5 \text{ А.}$$

Таблица 5.7

Параметр	Варианты				
	1	2	3	4	5
$P_{\text{ном}}, \text{кВт}$	10	—	—	18	45
$U_{\text{ном}}, \text{В}$	230	230	460	230	—
$n_{\text{ном}}, \text{об/мин}$	1450	—	—	1500	1000
$\Sigma r, \text{Ом}$	0,3	0,15	—	—	—
$r_{\text{в}}, \text{Ом}$	150	100	—	—	92
$\eta_{\text{ном}}, \%$	86,5	—	88	—	88
$I_{\text{ном}}, \text{А}$	—	87	—	—	97,8
$I_{\text{в}}, \text{А}$	—	—	4	—	—
$I_{\text{а ном}}, \text{А}$	—	—	—	75	—
$E_{\omega}, \text{В}$	—	—	480	240	477
$P_{\text{эм. ном}}, \text{кВт}$	—	—	55	—	—
$M_{\text{ном}}, \text{Н} \cdot \text{м}$	—	280	525	—	—
$P_{\text{1 ном}}, \text{кВт}$	—	23	—	21	—

2. Ток в обмотке возбуждения

$$I_{\text{в}} = U_{\text{ном}}/r_{\text{в}} = 230/150 = 1,5 \text{ А.}$$

3. Ток в цепи якоря при номинальной нагрузке

$$I_{\text{а ном}} = I_{\text{ном}} + I_{\text{в}} = 43,5 + 1,5 = 45 \text{ А.}$$

4. ЭДС якоря в номинальном режиме

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

5. Электромагнитная мощность генератора при номинальной нагрузке

$$P_{\text{эм. ном}} = E_{\text{а}} I_{\text{а ном}} = 245,5 \cdot 45 = 11\,047 \text{ Вт.}$$

6. Электромагнитный момент генератора в режиме номинальной нагрузки

$$M_{\text{ном}} = 9,55 P_{\text{эм. ном}}/n_{\text{ном}} = 9,55 \cdot 11\,047/1450 = 73 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Двигатели постоянного тока

Задача 5.7. Двигатель постоянного тока параллельного возбуждения имеет следующие данные: номинальная мощность $P_{\text{ном}}$, напряжение питания $U_{\text{ном}}$, номинальная частота вращения $n_{\text{ном}}$, сопро-

Параметр	Варианты				
	1	2	3	4	5
$P_{\text{ном}}$, кВт	25	15	45	4,2	18
$U_{\text{ном}}$, В	440	220	440	220	220
$n_{\text{ном}}$, об/мин	1500	1000	1500	1500	1200
$\eta_{\text{ном}}$, %	85	83,8	88	78	84
$\sum r$, Ом	0,15	0,12	0,13	0,15	0,12
$r_{\text{в}}$, Ом	88	73	88	64	73

тивление обмоток в цепи якоря $\sum r$, сопротивление цепи возбуждения $r_{\text{в}}$, падение напряжения в щеточном контакте щеток $\Delta U_{\text{щ}} = 2$ В. Значения перечисленных параметров приведены в табл. 5.8.

Требуется определить потребляемый двигателем ток в режиме номинальной нагрузки $I_{\text{ном}}$, сопротивление пускового реостата $R_{\text{п.р}}$, при котором начальный пусковой ток в цепи якоря двигателя был бы равен $2,5I_{\text{аном}}$, начальный пусковой момент $M_{\text{п}}$, частоту вращения n_0 и ток I_0 в режиме холостого хода, номинальное изменение частоты вращения якоря двигателя при сбросе нагрузки. Влиянием реакции якоря пренебречь.

Р е ш е н и е варианта 1.

1. Потребляемая двигателем мощность при номинальной нагрузке

$$P_{\text{Iном}} = P_{\text{ном}} / \eta_{\text{ном}} = 25 / 0,85 = 29,4 \text{ кВт.}$$

2. Ток, потребляемый двигателем при номинальной нагрузке,

$$I_{\text{ном}} = P_{\text{Iном}} / U_{\text{ном}} = 29,4 \cdot 10^3 / 440 = 67 \text{ А.}$$

3. Ток в цепи обмотки возбуждения

$$I_{\text{в}} = U_{\text{ном}} / r_{\text{в}} = 440 / 88 = 5 \text{ А.}$$

4. Ток в обмотке якоря

$$I_{\text{а ном}} = I_{\text{ном}} - I_{\text{в}} = 67 - 5 = 62 \text{ А.}$$

5. Начальный пусковой ток якоря при заданной кратности 2,5

$$I_{\text{ап}} = 2,5I_{\text{аном}} = 2,5 \cdot 62 = 155 \text{ А.}$$

6. Требуемое сопротивление цепи якоря при заданной кратности пускового тока 2,5

$$R_{\text{а}} = R_{\text{п.р}} + \sum r = U_{\text{ном}} / I_{\text{ап}} = 440 / 155 = 2,83 \text{ Ом.}$$

7. Сопротивление пускового реостата

$$R_{\text{п.р}} = R_{\text{а}} - \sum r = 2,83 - 0,15 = 2,68 \text{ Ом.}$$

8. ЭДС якоря в режиме номинальной нагрузки

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

9. Из выражения

$$E_a = c_e \Phi n,$$

определим

$$c_e \Phi = E_a / n = 428,7 / 1500 = 0,285;$$

отношение коэффициентов

$$c_m / c_e = [pN / (2\pi a)] / [pN / (60a)] = 9,55;$$

следовательно, в данном случае

$$c_m \Phi = 9,55 c_e \Phi = 9,55 \cdot 0,285 = 2,72.$$

10. Начальный пусковой момент при заданной кратности пускового тока 2,5

$$M_{\text{п}} = c_m \Phi I_{a\text{п}} = 2,72 \cdot 155 = 422 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

11. Момент на валу двигателя при номинальной нагрузке

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

12. Электромагнитный момент при номинальной нагрузке

$$M_{\text{ном}} = 9,55 P_{\text{эм}} / n_{\text{ном}} = 9,55 \cdot 26\,579 / 1500 = 169 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

где электромагнитная мощность при номинальной нагрузке

$$P_{\text{эм. ном}} = E_{a\text{ном}} I_{a\text{ном}} = 428,7 \cdot 62 = 26\,579 \text{ Вт.}$$

13. Момент холостого хода

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

14. Ток якоря в режиме холостого хода

$$I_{a0} = M_0 / (c_m \Phi) = 10 / 2,72 = 3,68 \text{ А.}$$

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

$$E_{a0} = U_{\text{ном}} - I_{a0} \sum r = 440 - 3,68 \cdot 0,15 = 439 \text{ В.}$$

16. Частота вращения якоря в режиме холостого хода

$$n_0 = E_{a0} / (c_e \Phi) = 439 / 0,285 = 1540 \text{ об/мин.}$$

17. Номинальное изменение частоты вращения двигателя при сбросе нагрузки

$$\Delta n_{\text{ном}} = \frac{n_0 - n_{\text{ном}}}{n_{\text{ном}}} 100 = \frac{1540 - 1500}{1500} 100 = 2,66 \text{ \%}.$$

Задача 5.8. В табл. 5.9 даны значения параметров двигателя постоянного тока независимого возбуждения: номинальная мощность двигателя $P_{\text{ном}}$, напряжение питания цепи якоря $U_{\text{ном}}$, напряжение питания цепи возбуждения $U_{\text{в}}$, частота вращения якоря в номинальном режиме $n_{\text{ном}}$, сопротивления цепи якоря Σr и цепи возбуждения $r_{\text{в}}$, приведенные к рабочей температуре, падение напряжения в щеточном контакте при номинальном токе $\Delta U_{\text{щ}} = 2$ В, номинальное изменение напряжения при сбросе нагрузки $\Delta n_{\text{ном}} = 8,0\%$, ток якоря в режиме холостого хода I_0 . Требуется определить все виды потерь и КПД двигателя.

Таблица 5.9

Параметр	Варианты					
	1	2	3	4	5	6
$P_{\text{ном}}$, кВт	25	40	53	75	16	11
$U_{\text{ном}}$, В	440	440	440	440	220	220
$U_{\text{в}}$, В	220	220	220	220	220	110
I_0 , А	6,0	7,5	8,0	10,8	8,7	5,8
Σr , Ом	0,30	0,17	0,12	0,70	0,18	0,27
$r_{\text{в}}$, Ом	60	55	42	40	60	27
$n_{\text{ном}}$, об/мин	2200	1000	2360	3150	1500	800

Решение варианта 1.

1. Частота вращения в режиме холостого хода

$$n_0 = n_{\text{ном}}[1 + (\Delta n_{\text{ном}}/100)] = 2200(1 + 8/100) = 2376 \text{ об/мин.}$$

2. ЭДС якоря в режиме холостого хода (падением напряжения в щеточном контакте пренебрегаем ввиду его незначительной величины в режиме холостого хода)

$$E_{a0} = U_{\text{ном}} - I_0 \Sigma r = 440 - 6 \cdot 0,3 = 438,2 \text{ В.}$$

3. Момент в режиме холостого хода

$$M_0 = 9,55 E_{a0} I_0 / n_0 = 9,55 \cdot 438,2 \cdot 6 / 2376 = 10,6 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

4. Момент на валу двигателя в режиме номинальной нагрузки

$$M_{2\text{ном}} = 9,55 P_{\text{ном}} / n_{\text{ном}} = 9,55 \cdot 25 \cdot 10^3 / 2200 = 108,5 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

5. Электромагнитный момент двигателя при номинальной нагрузке

$$M_{\text{ном}} = M_0 + M_{2\text{ном}} = 10,6 + 108,5 = 119 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

6. Электромагнитная мощность двигателя в режиме номинальной нагрузки

$$P_{\text{эм ном}} = 0,105 M_{\text{ном}} n_{\text{ном}} = 0,105 \cdot 119 \cdot 2200 = 27\,490 \text{ Вт.}$$

7. ЭДС якоря в режиме холостого хода можно представить как

$$E_a = c_e \Phi n_0$$

откуда

$$c_e \Phi = E_{a0}/n_0 = 438,2/2376 = 0,185,$$

но так как $c_m/c_e = 9,55$, то

$$c_m \Phi = 9,55 c_e \Phi = 9,55 \cdot 0,185 = 1,77.$$

Из выражения электромагнитного момента в режиме номинальной нагрузки

$$M_{\text{ном}} = c_m \Phi I_{\text{а ном}}$$

определим значение тока якоря в режиме номинальной нагрузки

$$I_{\text{а ном}} = M_{\text{ном}}/(c_m \Phi) = 119/1,77 = 67 \text{ А.}$$

8. Сумма магнитных и механических потерь двигателя пропорциональна моменту холостого хода

$$P_{\text{магн}} + P_{\text{мех}} = 0,105 M_0 n_0 = 0,105 \cdot 10,6 \cdot 2376 = 2644 \text{ Вт.}$$

9. Электрические потери в цепи обмотки якоря

$$P_{\text{аз}} = I_{\text{а ном}}^2 \sum r = 67^2 \cdot 0,3 = 1347 \text{ Вт.}$$

10. Электрические потери в щеточном контакте якоря

$$P_{\text{щ.э}} = I_{\text{а ном}} \Delta U_{\text{щ}} = 67 \cdot 2 = 134 \text{ Вт.}$$

11. Мощность, подводимая к цепи якоря, в номинальном режиме

$$P_{1\text{а ном}} = U_{\text{ном}} I_{\text{а ном}} = 440 \cdot 67 = 29\,480 \text{ Вт.}$$

12. Ток в обмотке возбуждения

$$I_{\text{в}} = U_{\text{в}}/r_{\text{в}} = 220/60 = 3,7 \text{ А.}$$

13. Мощность в цепи возбуждения

$$P_{\text{в}} = U_{\text{в}} I_{\text{в}} = 220 \cdot 3,7 = 814 \text{ Вт.}$$

14. Мощность, потребляемая двигателем в режиме номинальной нагрузки,

$$P_{1\text{ ном}} = P_{1\text{а ном}} + P_{\text{в}} = 29\,480 + 814 = 30\,295 \text{ Вт или } 30,3 \text{ кВт.}$$

15. КПД двигателя в номинальном режиме

$$\eta_{\text{ном}} = (P_{\text{ном}}/P_{1\text{ ном}})100 = (25/30,3)100 = 82,5 \text{ \%}.$$

Задача 5.9. В табл. 5.10 приведены данные каталога на двигатели постоянного тока независимого возбуждения серии 2П: номинальная мощность $P_{\text{ном}}$, номинальное напряжение, подводимое к цепи якоря, $U_{\text{ном}}$, номинальная частота вращения $n_{\text{ном}}$, КПД двигателя $\eta_{\text{ном}}$, сопротивление цепи якоря, приведенное к рабочей темпе-

Тип двигателя	$P_{ном}$, кВт	$U_{ном}$, В	$n_{ном}$, об/мин	$\eta_{ном}$, %	Σr , Ом
2ПО200L	7,1	220	750	83,5	0,48
2ПО200М	20	440	2200	90	0,28
2ПФ200М	30	440	2200	90	0,22
2ПФ200L	20	220	1000	85,5	0,18
2ПН225М	37	220	1500	86,5	0,07
2ПФ225М	10	220	500	74,5	0,58
2ПО180М	17	440	3000	90	0,31

ратуре, Σr . Требуется определить сопротивление добавочного резистора r_d , который следует включить в цепь якоря, чтобы при номинальной нагрузке двигателя частота вращения якоря составила $0,5n_{ном}$; построить естественную и искусственную механические характеристики двигателя.

Решение варианта с двигателем 2ПО200L.

1. Ток в цепи якоря в режиме номинальной нагрузки при $n_{ном} = 750$ об/мин

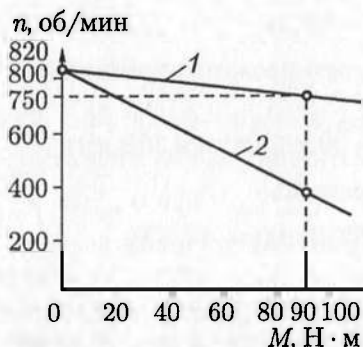
$$I_{а ном} = P_{ном} / (\eta_{ном} U_{ном}) = 7,1 \cdot 10^3 / (0,835 \cdot 220) = 38,6 \text{ А.}$$

2. ЭДС в режиме номинальной нагрузки (падением напряжения в щеточном контакте пренебрегаем)

$$E_{ном} = U_{ном} - I_{а ном} \Sigma r = 220 - 38,6 \cdot 0,48 = 201,5 \text{ В.}$$

3. Частота вращения идеального холостого хода (пограничная частота вращения)

$$n_0 = 60 \cdot (U_{ном} / E_{ном}) = 750(220/201,5) = 820 \text{ об/мин.}$$



4. Номинальный момент на валу двигателя

$$M_{2 ном} = 9,55 P_{ном} / n_{ном} = 9,55 \cdot 7,1 \cdot 10^3 / 750 = 90 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

По полученным данным строим естественную механическую характеристику (рис. 5.8, график 1).

5. Частота вращения при включении резистора r_d

$$n'_{ном} = 0,5 n_{ном} = 0,5 \cdot 750 = 375 \text{ об/мин.}$$

Рис. 5.8. Механические характеристики двигателя постоянного тока

По вычисленным данным строим искусственную механическую характеристику двигателя (рис. 5.8, график 2).

6. Сопротивление резистора r_d

$$r_d = (U_{ном}/I_{а ном})[1 - (n'_{ном}/n_{0в})] - \sum r = \\ = (220/38,6)[1 - (375/820)] - 0,48 = 2,61 \text{ Ом.}$$

Задача 5.10. Двигатель постоянного тока параллельного возбуждения работает от сети напряжением $U_c = 220 \text{ В}$. Технические данные двигателя (табл. 5.11): номинальный ток нагрузки $I_{ном}$, номинальная частота вращения $n_{ном}$, ток холостого хода I_0 , сопротивление цепи якоря, приведенное к рабочей температуре, $\sum r$, ток возбуждения I_b (остается неизменным во всем диапазоне нагрузки двигателя); в двигателе применены угольно-графитные щетки (см. табл. 5.1) 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 $\Phi = \text{const}$.

Т а б л и ц а 5.11

Параметр	Варианты					
	1	2	3	4	5	6
$I_{ном}, \text{ А}$	65	86	116	192	44	33
$n_{ном}, \text{ об/мин}$	770	690	650	575	840	1100
$I_0, \text{ А}$	6,5	9,0	9,8	13,4	6,6	5,8
$\sum r, \text{ Ом}$	0,28	0,17	0,11	0,055	0,42	0,57
$I_b, \text{ А}$	1,6	2,2	2,7	4,0	1,5	1,18

Р е ш е н и е варианта 1.

1. Потери и КПД двигателя.

Постоянные потери двигателя включают магнитные P_m , механические $P_{мех}$ потери и потери на возбуждение

$$P_b = U_c I_b = 220 \cdot 1,6 = 352 \text{ Вт,}$$

т. е.

$$P_{пост} = P_m + P_{мех} + P_b.$$

При работе двигателя в режиме холостого хода двигатель потребляет из сети мощность $P_{10} = I_{a0} U_c$, которая включает помимо постоянных потерь $P_{пост}$ еще и переменные потери $P_{пер}$, которые включают:

электрические потери в цепи якоря

$$P_{эл} = I_a^2 \sum r$$

потери в щеточном контакте

$$P_{\text{щ0}} = I_{a0} \Delta U_{\text{щ}};$$

добавочные потери

$$P_{\text{доб}} = 0,01 P_{10} = 0,01 I_0 U_c.$$

Таким образом, постоянные потери двигателя равны

$$\begin{aligned} P_{\text{пост}} &= P_{10} - P_{\text{э0}} - P_{\text{щ0}} = I_0 U_c - I_{a0}^2 \sum r - I_{a0} \Delta U_{\text{щ}} - 0,01 I_0 U_c = \\ &= 6,5 \cdot 220 - 4,9^2 \cdot 0,28 - 4,9 \cdot 2 - 0,01 \cdot 6,5 \cdot 220 = 1399 \text{ Вт}, \end{aligned}$$

где ток якоря в режиме холостого хода

$$I_{a0} = I_0 - I_b = 6,5 - 1,6 = 4,9 \text{ А}.$$

Чтобы получить данные, необходимые для построения графика $\eta = f(P_2)$, зададимся рядом значений коэффициента нагрузки $\beta = I_a / I_{a\text{ном}}$ и для каждого из них определим КПД двигателя. Ток в цепи якоря в режиме номинальной нагрузки $I_{a\text{ном}} = I_{\text{ном}} - I_b = 65 - 1,6 = 63,4 \text{ А}$.

Минимальное значение коэффициента нагрузки соответствует режиму холостого хода $\beta = I_{a0} / I_{a\text{ном}} = 4,9 / 63,4 \approx 0,08$. Принимаем следующие значения коэффициента нагрузки: $\beta = 0,08; 0,25; 0,50; 0,75; 1,0; 1,20$.

Таблица 5.12

Параметр	Значения параметра					
$\beta = I_a / I_{a\text{ном}}$	0,08	0,25	0,50	0,75	1,0	1,20
$I_a = I_{a\text{ном}} \beta, \text{ А}$	4,9	15,85	31,7	47,55	63,4	76,1
$I = I_a + I_b, \text{ А}$	6,5	17,45	33,3	49,15	65	77,7
$P_1 = IU_c, \text{ Вт}$	1430	3839	7326	10 813	14 300	17 094
$P_{\text{пост}}, \text{ Вт}$	1399	1399	1399	1399	1399	1399
$P_{\text{за}} = I_a^2 \sum r, \text{ Вт}$	6,7	70,34	281,16	633,1	1125	1621
$P_{\text{доб}} = 0,01 P_1, \text{ Вт}$	14,3	38,39	73,26	108,13	143	170,9
$P_{\text{щ}} = I_a \Delta U_{\text{щ}}, \text{ Вт}$	9,8	31,7	63,4	95,1	126,8	152,2
$P_{\text{пер}} = P_{\text{за}} + P_{\text{щ}} + P_{\text{доб}}, \text{ Вт}$	33,5	140,4	417,8	836,3	1395	1944
$\sum P = P_{\text{пост}} + P_{\text{пер}}, \text{ Вт}$	1430	1539	1817	2235	2794	3343
$P_2 = P_1 - \sum P, \text{ Вт}$	0	2300	5509	8578	11 506	13 751
$\eta = (P_2 / P_1) 100$	0	59,9	75,2	79,3	80,5	80,4

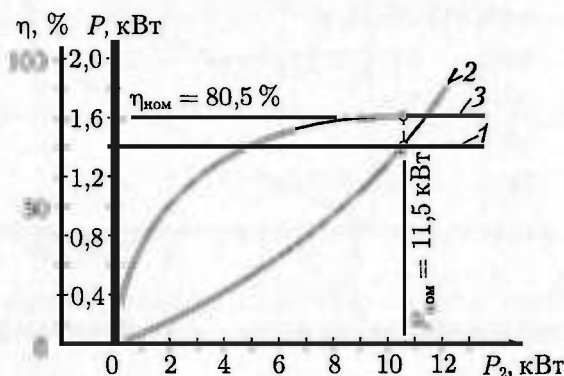


Рис. 5.9. Графики постоянных потерь (1), переменных потерь (2) и коэффициента полезного действия (3) двигателя постоянного тока параллельного возбуждения

Все расчетные формулы и результаты расчетов приведены в табл. 5.12.

По данным табл. 5.12 построены графики $P_{\text{пост}} = f(P_2)$, $P_{\text{пер}} = f(P_2)$ и $\eta = f(P_2)$. Точка пересечения графиков постоянных потерь (рис. 5.9, график 1) и переменных потерь (график 2) соответствует равенству потерь, а следовательно, эта точка совпадает с максимальным значением КПД $\eta_{\text{ном}} = 80,5\%$. Указанная точка совпадает с номинальной нагрузкой двигателя ($\beta = 1$) и, следовательно, $\eta_{\text{ном}} = \eta_{\text{max}} = 80,5\%$.

2. Зависимости частоты вращения и момента на валу от нагрузки двигателя. Частота вращения двигателя постоянного тока определяется выражением:

$$n = \frac{U_c - I_a \sum r}{c_e \Phi}$$

Таблица 5.13

Параметр	Значения параметра					
$\beta = I_a / I_{\text{ном}}$	0,08	0,25	0,50	0,75	1,0	1,20
$I_a - I_{\text{ном}} \beta$	4,9	15,85	31,7	47,55	63,4	76,1
$I_a \sum r, \text{ В}$	1,37	4,44	8,87	13,31	17,75	21,31
$E_a = U_c - I_a \sum r, \text{ В}$	218,6	215,6	211,1	206,7	202,25	198,7
$n = E_a / c_e \Phi, \text{ об/мин}$	831	820	803	786	769	755
$P_2, \text{ Вт}$	0	2300	5509	8578	11 506	13 751
$M_2 = 9,55 P_2 / n, \text{ Н} \cdot \text{ м}$	0	26,8	65,5	104,2	143	174

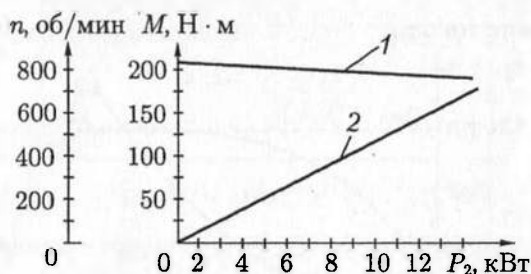


Рис. 5.10. Графики зависимости частоты вращения (1) и момента на валу (2) от нагрузки двигателя постоянного тока параллельного возбуждения

Используя параметры номинального режима нагрузки двигателя, определим величину

$$c_e \Phi = \frac{U_c - I_{a \text{ ном}} \sum r}{n_{\text{ном}}} = \frac{220 - 63,4 \cdot 0,28}{770} = 0,263$$

Полученное значение $c_e \Phi = 0,263$ следует принять постоянным для данного двигателя, так как по условию задачи $\Phi = \text{const}$.

Используя данные табл. 5.12, рассчитаем частоту вращения двигателя для принятых значений коэффициента нагрузки $\beta = I_a / I_{a \text{ ном}}$. Расчетные формулы и результаты расчета приведены в табл. 5.13.

3. Зависимость момента M_2 на валу от нагрузки двигателя. Момент на валу двигателя определяется выражением

$$M_2 = 9,55 P_2 / n.$$

Используя данные табл. 5.12, рассчитаем значения момента M_2 для принятых коэффициентов нагрузки $\beta = I_a / I_{a \text{ ном}}$. Результаты расчета заносим в табл. 5.13, а затем строим графики зависимостей $n = f(P_2)$ и $M_2 = f(P_2)$, представленные на рис. 5.10.

Задача 5.11. Рассчитать *трехступенчатый* пусковой реостат для двигателя постоянного тока независимого возбуждения, технические данные которого приведены в табл. 5.10.

Решение варианта с двигателем 2ПО200Л ($P_{\text{ном}} = 7,1$ кВт; $U_{\text{ном}} = 220$ В; $\eta_{\text{ном}} = 82,5$; $\sum r = 0,48$ Ом; $I_{a \text{ ном}} = 38,6$ А).

1. Принимаем:

значение начального пускового тока

$$I_1 = 2,0 I_{a \text{ ном}} = 2,0 \cdot 38,6 = 77,2 \text{ А},$$

значение тока переключений

$$I_2 = I_{a \text{ ном}} = 38,6 \text{ А}.$$

2. Отношение токов

$$\lambda = I_1/I_2 = 2,0.$$

3. Сопротивление резистора третьей ступени пускового реостата (см. рис. 5.4)

$$r_{\text{доб3}} = \sum r(\lambda - 1) = 0,48(2,0 - 1) = 0,48 \text{ Ом.}$$

4. Сопротивление резистора второй ступени пускового реостата

$$r_{\text{доб2}} = r_{\text{доб3}}\lambda = 0,48 \cdot 2,0 = 0,96 \text{ Ом.}$$

5. Сопротивление резистора первой ступени пускового реостата

$$r_{\text{доб1}} = r_{\text{доб2}}\lambda = 0,96 \cdot 2,0 = 1,92 \text{ Ом.}$$

6. Сопротивление пускового реостата на первой ступени, когда все три резистора соединены последовательно,

$$R_{\text{ПР1}} = r_{\text{доб1}} + r_{\text{доб2}} + r_{\text{доб3}} = 1,92 + 0,96 + 0,48 = 3,36 \text{ Ом.}$$

7. Сопротивление пускового реостата на второй ступени

$$R_{\text{ПР2}} = r_{\text{доб2}} + r_{\text{доб3}} = 0,96 + 0,48 = 1,44 \text{ Ом.}$$

8. Сопротивление пускового реостата на третьей ступени

$$R_{\text{ПР3}} = r_{\text{доб3}} = 0,48 \text{ Ом.}$$

Задача 5.12. Крановый двигатель постоянного тока последовательного возбуждения серии Д мощностью $P_{\text{ном}}$ включен в сеть напряжением 220 В и при номинальной нагрузке развивает частоту вращения $n_{\text{ном}}$. Требуется рассчитать данные и построить график зависимости тока нагрузки от момента нагрузки двигателя $I_a = f(M)$. Моментом холостого хода пренебречь. Значения перечисленных параметров двигателей приведены в табл. 5.14.

Таблица 5.14

Тип двигателя	$P_{\text{ном}}$ кВт	$U_{\text{ном}}$ В	$\eta_{\text{ном}}$ %	$n_{\text{ном}}$ об/мин
Д-806	22	220	85	575
Д-808	37	220	88	525
Д-810	55	440	89	500
Д-812	75	440	89,5	475
Д-814	110	440	90	460
Д-32	12	220	80	675
Д-41	16	220	82	650

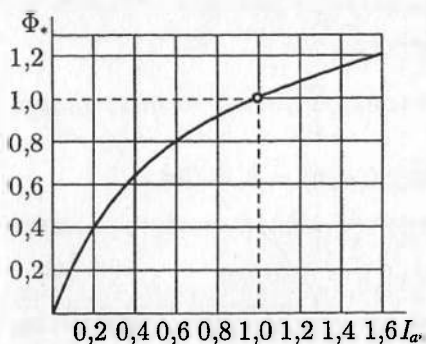


Рис. 5.11. Зависимость основного магнитного потока двигателя от тока в цепи якоря

ря $I_{a*} = I_a / I_{a\text{ном}}$, которым следует воспользоваться при решении задачи.

Зависимость между током нагрузки I_a и моментом M

$$I_a = M / (c_m \Phi).$$

Для номинальных значений тока и момента эта зависимость имеет вид

$$I_{a\text{ном}} = M_{\text{ном}} / (c_m \Phi_{\text{ном}})$$

Переходя к относительному значению тока нагрузки $I_{a*} = I_a / I_{a\text{ном}}$, получим

$$I_{a*} = \frac{M / (c_m \Phi)}{M_{\text{ном}} / (c_m \Phi_{\text{ном}})} = \frac{M / \Phi}{M_{\text{ном}} / \Phi_{\text{ном}}} = (M / M_{\text{ном}}) (\Phi_{\text{ном}} / \Phi) = M_* / \Phi_*,$$

или

$$I_{a*} \Phi_* = M_*.$$

Задавшись рядом относительных значений тока нагрузки I_{a*} , по графику $\Phi_* = f(I_{a*})$ определяют Φ_* , а затем, перемножив эти величи-

Решение варианта с двигателем Д-806.

В связи с тем, что в двигателе последовательного возбуждения ток якоря является одновременно и током возбуждения, основной магнитный поток двигателя Φ зависит от тока нагрузки I_a . Но так как магнитная система двигателя находится в состоянии магнитного насыщения, указанная зависимость нелинейна. На рис. 5.11 показан график зависимости относительных значений магнитного потока $\Phi_* = \Phi / \Phi_{\text{ном}}$ от тока якоря

Таблица 5.15

Параметр	Значения параметра				
I_{a*}	0,2	0,6	1,0	1,2	1,6
Φ_*	0,4	0,8	1,0	1,08	1,2
M_*	0,08	0,48	1,0	1,3	1,9
$I_a, \text{А}$	24	71	118	142	189
$M, \text{Н} \cdot \text{м}$	28	175	365	475	694

ны, получают значения M_* . Умножив относительные величины на номинальные, получают именованные значения тока I_a (А) и момента M (Н·м).

Результаты вычислений заносят в табл. 5.15, а затем строят требуемый график $I_a = f(M)$, представленный на рис. 5.12.

Номинальное значение тока якоря

$$I_{a\text{ном}} = P_{\text{ном}} / (I_{\text{ном}} U_{\text{ном}}) = 22 \cdot 10^3 / (0,85 \cdot 220) = 118 \text{ А.}$$

Номинальное значение момента

$$M_{\text{ном}} = 9,55 P_{\text{ном}} / n_{\text{ном}} = 9,55 \cdot 22 \cdot 10^3 / 575 = 365 \text{ Н·м.}$$

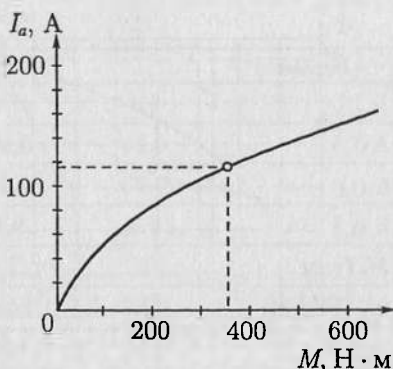


Рис. 5.12. Зависимость $I_a = f(M)$ для двигателя постоянного тока последовательного возбуждения

Задача 5.13. Крановый двигатель постоянного тока последовательного возбуждения серии Д, работающий от сети напряжением 220 В, имеет номинальные данные, приведенные в табл. 5.16 (мощность $P_{\text{ном}}$; ток $I_{\text{ном}}$; частота вращения $n_{\text{ном}}$). Требуется рассчитать и построить естественную ($r_{\text{доб}} = 0$) и искусственную ($r_{\text{доб}} = 2 \sum r$) механические характеристики двигателя.

Решение варианта с двигателем Д12.

Для получения данных, необходимых для построения механических характеристик двигателя последовательного возбуждения, воспользуемся универсальными естественными характеристиками двигателей постоянного тока последовательного возбуждения (см. рис. 5.5). С этой целью задаемся рядом относительных значений тока (не менее пяти значений) и по универсальным характеристикам определяем соответствующие относительные значения момента M_* и частоты вращения n_* . Затем, используя номинальные значения этих величин, определяют именованные значения указанных величин по формулам:

$$I = I_{\text{ном}} I_*; n_e = n_{\text{ном}} n_*; M = M_{\text{ном}} M_*.$$

Таблица 5.16

Параметр	Значения параметра двигателей типа				
	Д12	Д21	Д22	Д31	Д32
$P_{\text{ном}}$, кВт	2,5	4,5	6,0	8,0	12,0
$I_{\text{ном}}$, А	16	28	36	45	69
$n_{\text{ном}}$, об/мин	1100	900	850	800	675

Таблица 5.17

Параметр	Значения параметра				
I_*	0,4	0,6	1	1,6	2,0
M_*	0,23	0,55	1,0	1,9	2,58
n_{c*}	1,83	1,32	1,0	0,73	0,62
I, A	6,4	9,6	16	25,6	32
$M, H \cdot m$	5	11,9	21,7	41,2	56
$n_c, об/мин$	2013	1452	1100	803	682
E_{ae}, B	201	191	172	143	124
$E_{a.и}, B$	162	134	76	-10	-68
$E_{a.и}/E_{a.e}$	0,80	0,70	0,44	-0,06	-0,55
$n_n, об/мин$	1610	1016	484	-48	-68

Результаты расчета заносят в табл. 5.17.

1. Номинальный КПД двигателя

$$\eta_{ном} = P_{ном}/(UI_{ном}) = 2500/(220 \cdot 16) = 0,71.$$

2. Номинальное сопротивление двигателя

$$R_{ном} = U/I_{ном} = 220/16 = 13,75 \text{ Ом}.$$

3. Сопротивление цепи якоря

$$\Sigma r = 0,75 R_{ном} (1 - \eta_{ном}) = 0,75 \cdot 13,75 (1 - 0,71) = 3 \text{ Ом}.$$

4. Сопротивление внешнего резистора в цепи якоря

$$r_{доб} = 2 \Sigma r = 2 \cdot 3 = 6 \text{ Ом}.$$

5. Номинальный момент двигателя

$$M_{ном} = 9,55 \cdot 10^3 P_{ном} / n_{ном} = 9,55 \cdot 10^3 \cdot 2,5 / 1100 = 21,7 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

6. Используя данные табл. 5.17, определяют параметры искусственной характеристики двигателя, для чего рассчитывают следующие величины:

ЭДС якоря в режиме естественной характеристики

$$E_{a.e} = U - I \Sigma r;$$

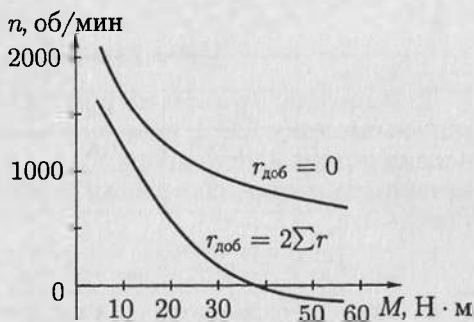
ЭДС якоря в режиме искусственной характеристики

$$E_{a.и} = U - I(\Sigma r + r_d);$$

частоту вращения в режиме искусственной характеристики

$$n_n = n_c (E'_{a.и} / E_{a.e}).$$

Рис. 5.13. Механические характеристики двигателя постоянного тока последовательного возбуждения



Выполнив вычисления по приведенным формулам для всех значений тока I_a , результаты заносят в табл. 5.17 и строят механические характеристики двигателя (рис. 5.13).

Задача 5.14. Двигатель постоянного тока последовательного возбуждения включен в сеть напряжением $U_{\text{ном}}$ и в режиме номинальной нагрузки потребляет ток $I_{\text{ном}}$, падение напряжения в щеточном контакте $\Delta U_{\text{щ}} = 2 \text{ В}$.

Используя рабочие характеристики двигателя (см. приложение 2) и значения параметров, приведенные в табл. 5.18, определить:

а) сопротивление цепи якоря Σr и построить естественную механическую характеристику двигателя $n = f(M_2)$;

б) рассчитать данные и построить искусственную механическую характеристику при включении последовательно в цепь якоря резистора сопротивлением $r_{\text{доб}} = 3\Sigma r$.

При решении задачи считать, что магнитные и механические потери двигателя во всем диапазоне изменения частоты вращения остаются неизменными; добавочными потерями пренебречь.

Таблица 5.18

Параметр	Варианты			
	1 (рис. П.2.7)	2 (рис. П.2.8)	3 (рис. П.2.9)	4 (рис. П.2.10)
$U_{\text{ном}}, \text{В}$	220	440	220	440
$I_{a \text{ ном}}, \text{А}$	160	240	250	500

Решение варианта 1 (рис. П.2.7)

1. Максимальное значение КПД $\eta_{\text{max}} = 88\%$ соответствует току в цепи якоря $I_a = 100 \text{ А}$; при этом сумма потерь в двигателе составляет 12% от потребляемой двигателем мощности

$$P_1 = U_{\text{ном}} I_a = 220 \cdot 100 = 22\,000 \text{ Вт},$$

т. е.

$$\Sigma P = 22\,000 \cdot 0,12 = 2640 \text{ Вт.}$$

2. Известно, что при нагрузке двигателя, соответствующей его максимальному КПД, переменные потери, состоящие из электрических потерь в цепи якоря $P_{aэ}$ и в контакте щеток $P_{щэ}$, равны постоянным потерям, состоящим из магнитных P_m и механических $P_{мех}$ потерь, т. е.

$$(P_{aэ} + P_{щэ}) = (P_{magн} + P_{мех}) = 0,5 \cdot 2640 = 1320 \text{ Вт.}$$

3. Электрические потери в щеточном контакте

$$P_{щэ} = I_a \Delta U_{щ} = 100 \cdot 2 = 200 \text{ Вт.}$$

4. Электрические потери в цепи якоря

$$P_{aэ} = (P_{aэ} + P_{щэ}) - P_{щэ} = 1320 - 200 = 1120 \text{ Вт.}$$

5. Электрические потери в цепи якоря пропорциональны квадрату тока якоря

$$P_{aэ} = I_a^2 \Sigma r,$$

откуда сопротивление обмоток в цепи якоря

$$\Sigma r = P_{aэ} / I_a^2 = 1120 / 100^2 = 0,112 \text{ Ом.}$$

6. Для получения данных, требуемых для построения естественной механической характеристики, воспользуемся рабочими характеристиками двигателя (рис. П.2.7) и определим для ряда значений тока якоря I_a соответствующие этим значениям частоту вращения n и полезную мощность P_2 . По этим значениям определим соответствующие значения момента на валу двигателя

$$M_2 = 9,55 P_2 / n.$$

Значения перечисленных величин заносим в табл. 5.19, а затем строим естественную механическую характеристику двигателя $n = f(M_2)$ (рис. 5.14, график 1).

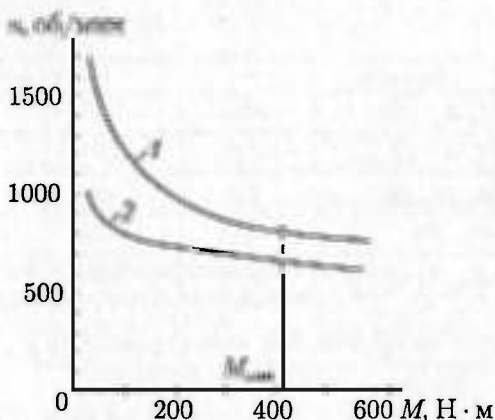
7. При включении последовательно в цепь якоря резистора сопротивлением

$$r_{доб} = 3 \Sigma r = 3 \cdot 0,112 = 0,336 \text{ Ом}$$

Таблица 5.19

Парамстр	Значения параметра				
I_a , А	40	80	120	160	200
n , об/мин	1600	1100	900	810	750
P_2 , Вт	6000	15 000	24 000	34 000	45 000
M_2 , Н · м	36	130	255	410	570

Рис. 5.14. Механические характеристики двигателя последовательного возбуждения



работа двигателя переходит в режим искусственной механической характеристики, при этом частота вращения якоря двигателя определяется выражением

$$n_{\text{и}} = \frac{U_{\text{ном}} - I_a(r_{\text{д}} + \sum r) - I_a \Delta U_{\text{ц}}}{c_e \Phi}$$

Величину $(c_e \Phi)$ определяем из выражения номинальной частоты вращения двигателя

$$n_{\text{ном}} = \frac{U_{\text{ном}} - I_{a \text{ ном}} \sum r - \Delta U_{\text{ц}}}{c_e \Phi}$$

откуда

$$\begin{aligned} c_e \Phi &= (U_{\text{ном}} - I_{a \text{ ном}} \sum r - \Delta U_{\text{ц}}) / n_{\text{ном}} = \\ &= (220 - 160 \cdot 0,112 - 2) / 810 = 0,247. \end{aligned}$$

Следовательно, частота вращения данного двигателя в режиме искусственной механической характеристики:

$$n_{\text{и}} = \frac{U_{\text{ном}} - I_a(r_{\text{доб}} + \sum r) - I_a \Delta U_{\text{ц}}}{c_e \Phi} = \frac{220 - I_a(0,336 + 0,112) - I_a \cdot 2}{0,247}$$

Для получения данных, необходимых для построения искусственной механической характеристики двигателя $n_{\text{и}} = f(M)$, задаем рядом значений тока якоря I_a (см. табл. 5.19) и для каждого из них рассчитываем частоту вращения $n_{\text{и}}$, полезную мощность $P_{2\text{и}}$ и момент $M_{2\text{и}}$.

Полезная мощность двигателя в режиме искусственной механической характеристики меньше мощности в режиме естествен-

Таблица 5.20

Параметр	Значения параметра				
I_a , А	40	80	120	160	200
$I_{a*} = I_a / I_{a\text{ном}}$	0,25	0,5	0,75	1,0	1,25
$n_{\text{н}}$, об/мин	836	780	723	666	610
$P_{2\text{н}}$, Вт	5462	12 850	19 160	25 400	31 560
$M_{2\text{н}}$, Н · м	62	157	253	364	520

ной механической характеристики P_2 на величину потерь в резисторе $r_{\text{доб}} = 0,336$ Ом, т. е.

$$P_{2\text{н}} = P_2 - I_a^2 r_{\text{доб}}.$$

Результаты расчета перечисленных параметров сводят в табл. 5.20, а затем строят искусственную механическую характеристику (рис. 5.14, график 2).

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

Некоторые основные и производные единицы международной системы единиц СИ

Физическая величина	Наименование единицы	Обозначение (русское)
Длина	метр	м
Масса	килограмм	кг
Время	секунда	с
Сила электрического тока	ампер	А
Плоский угол	радиан	рад
Площадь	квадратный метр	м ²
Объем, вместимость	кубический метр	м ³
Скорость линейная	метр в секунду	м/с
Ускорение	метр на секунду в квадрате	м/с ²
Угловая скорость	радиан в секунду	рад/с
Частота периодического процесса, частота колебаний	герц	Гц
Частота вращения*	секунда в минус первой степени	с ⁻¹
Плотность	килограмм на кубический метр	кг/м ³
Момент инерции	килограмм-метр в квадрате	кг · м ²
Сила, сила тяжести, вес	ньютон	Н
Момент силы, момент пары сил	ньютон-метр	Н · м
Давление, нормальное механическое напряжение	паскаль	Па
Работа, энергия	джоуль	Дж
Мощность	ватт	Вт
Температура Цельсия	градус Цельсия	°С
Теплота, количество теплоты	джоуль	Дж

Физическая величина	Наименование единицы	Обозначение (русское)
Количество электричества (электрический заряд)	кулон	Кл
Напряженность электрического поля	вольт на метр	В/м
Электрическое напряжение, электрический потенциал, электродвижущая сила (ЭДС)	вольт	В
Электрическая емкость	фарад	Ф
Плотность электрического тока	ампер на квадратный метр	А/м ²
Линейная плотность электрического тока	ампер на метр	А/м
Напряженность магнитного поля	ампер на метр	А/м
Магнитодвижущая сила, разность магнитных потенциалов	ампер	А
Магнитная индукция	тесла	Тл
Магнитный поток	вебер	Вб
Индуктивность, взаимная индуктивность	генри	Гн
Абсолютная магнитная проницаемость	генри на метр	Гн/м
Намагниченность (интенсивность намагничивания)	ампер на метр	А/м
Электрическое сопротивление (активное, реактивное, полное)	ом	Ом
Электрическая проводимость (активная, реактивная, полная)	сименс	См
Удельное электрическое сопротивление	ом-метр	Ом · м
Удельная электрическая проводимость	сименс на метр	См/м
Магнитное сопротивление	генри в минус первой степени	Гн ⁻¹
Магнитная проводимость	генри	Гн
Мощность: активная полная реактивная	ватт вольт-ампер вольт-ампер реактивные	Вт В А вар
Электромагнитная энергия	джоуль	Дж

* В технических документах и заводской практике частоту вращения принято измерять в единицах «обороты в минуту», обозначение мин⁻¹ или об/мин; 1 об/мин = 60 с⁻¹.

Единицы, применяемые наравне с единицами СИ

Величина	Наименование единицы	Обозначение единицы	Соотношение с единицей СИ
Масса	тонна	т	10^3 кг
Время	минута час сутки	мин ч сут	60 с 3 600 с 86 400 с
Плоский угол	градус минута секунда	° ' "	$\pi/180 \text{ рад} \approx 1,745\,329 \cdot 10^{-2} \text{ рад}$ $\pi/10\,800 \text{ рад} \approx 2,908\,882 \cdot 10^{-4} \text{ рад}$ $\pi/648\,000 \text{ рад} \approx 4,848\,137 \cdot 10^{-6} \text{ рад}$
Объем, вместимость	литр	л	10^{-3} м^3
Механическое напряжение	ньютон на квадратный миллиметр	Н/мм ²	1 МПа
Полная мощность	вольт-ампер	В · А	—
Реактивная мощность	вар	вар	—

Рабочие характеристики электродвигателей

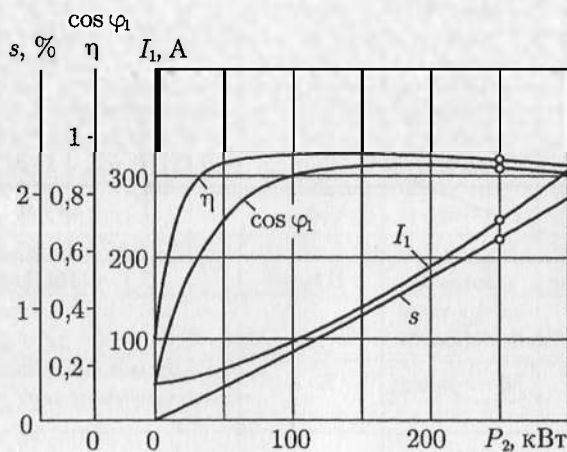


Рис. П.2.1. Рабочие характеристики трехфазного асинхронного двигателя мощностью $P_{ном} = 250 \text{ кВт}$

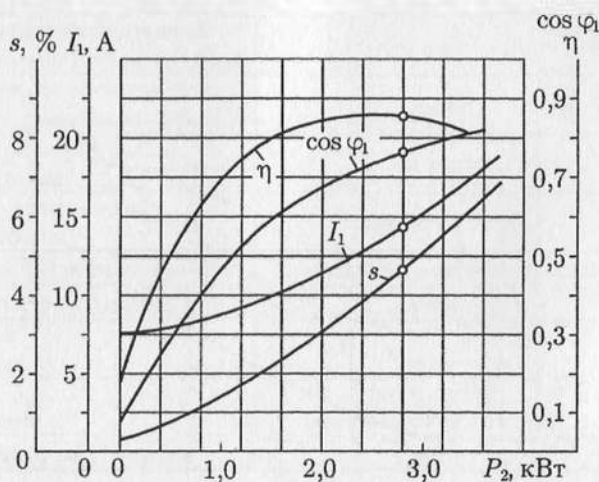


Рис. П.2.2. Рабочие характеристики трехфазного асинхронного двигателя мощностью $P_{ном}' = 2,8 \text{ кВт}$

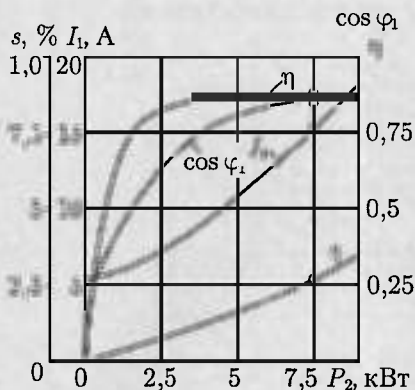


Рис. П.2.3. Рабочие характеристики трехфазного асинхронного двигателя мощностью $P_{\text{ном}} = 7,5 \text{ кВт}$

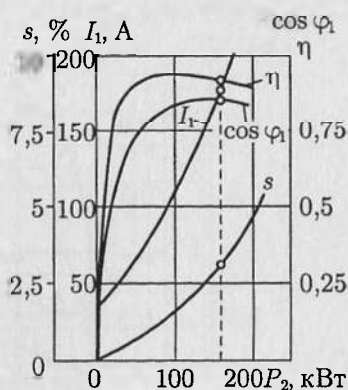


Рис. П.2.4. Рабочие характеристики трехфазного асинхронного двигателя мощностью $P_{\text{ном}} = 160 \text{ кВт}$

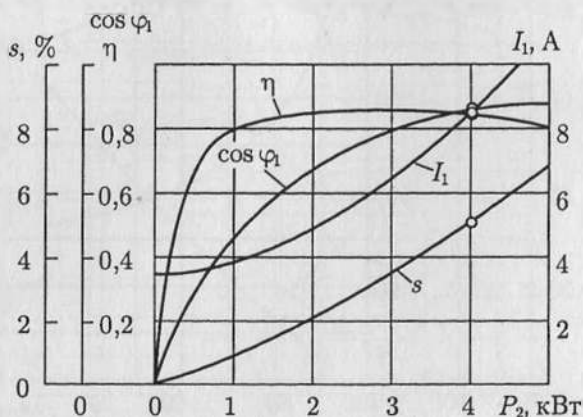


Рис. П.2.5. Рабочие характеристики трехфазного асинхронного двигателя мощностью $P_{\text{ном}} = 4,0 \text{ кВт}$.

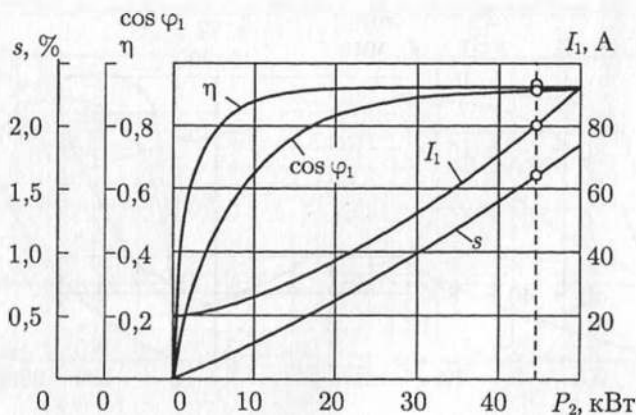


Рис. П.2.6. Рабочие характеристики трехфазного асинхронного двигателя мощностью $P_{ном} = 45 \text{ кВт}$

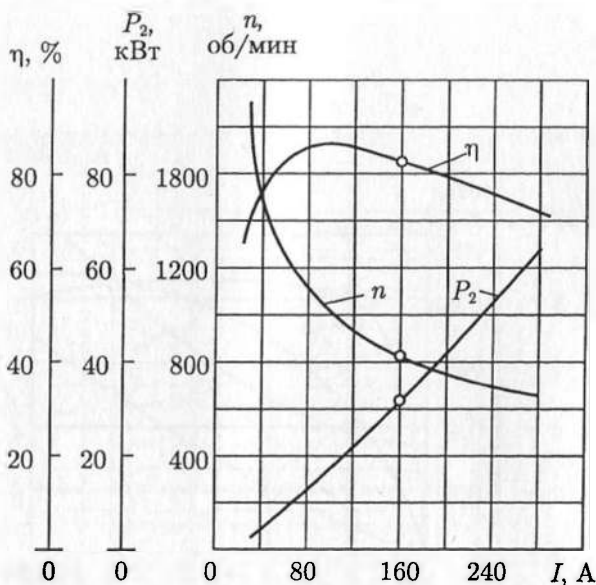


Рис. П.2.7. Рабочие характеристики двигателя постоянного тока последовательного возбуждения с номинальным током $I_{ном} = 160 \text{ А}$

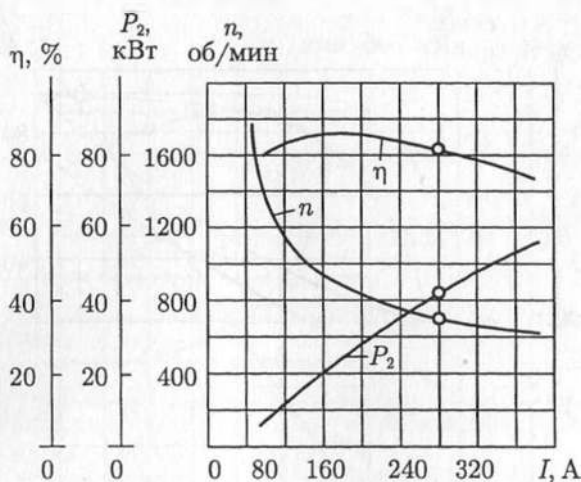


Рис. П.2.8. Рабочие характеристики двигателя постоянного тока последовательного возбуждения с номинальным током $I_{ном} = 240$ А

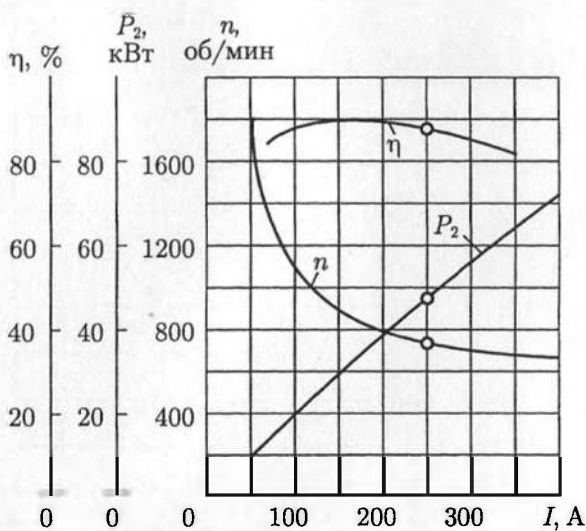


Рис. П.2.9. Рабочие характеристики двигателя постоянного тока последовательного возбуждения с номинальным током $I_{ном} = 250$ А

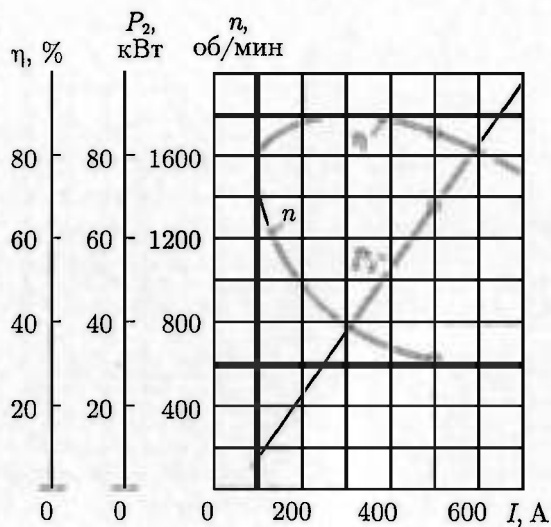


Рис. П.2.10. Рабочие характеристики двигателя постоянного тока последовательного возбуждения с номинальным током $I_{ном} = 500$ А

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кацман М. М.* Справочник по электрическим машинам. — М., 2005. — 479 с.
2. *Кацман М. М.* Электрические машины. — М., 2006. — 475 с.
3. *Кацман М. М.* Расчет и конструирование электрических машин. — М., 1984. — 359 с.
4. *Куликов А. А.* Сборник задач по электрическим машинам / А. А. Куликов, М. И. Немировский. — М., 1961. — 199 с.
5. Сборник задач по электротехнике и основам электроники / под ред. В. С. Пантюшина. — М., 1979. — 254 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Основные буквенные обозначения, принятые в книге	4
Глава 1. Трансформаторы	8
1.1. Основные понятия	8
1.2. Задачи	14
Коэффициент трансформации, ЭДС и токи в обмотках, параметры холостого хода и короткого замыкания	14
Векторная диаграмма, потери и КПД трансформатора	21
Параллельная работа трансформаторов. Автотрансформаторы	31
Глава 2. Общие вопросы теории бесколлекторных машин	36
2.1. Основные понятия	36
2.2. Задачи	39
Глава 3. Асинхронные двигатели	46
3.1. Основные понятия	46
3.2. Задачи	52
Скольжение, ЭДС и токи асинхронных двигателей	52
Потери и КПД, электромагнитный момент, механическая характеристика	58
Круговая диаграмма и рабочие характеристики	74
Пуск и регулирование частоты вращения	82
Глава 4. Синхронные машины	91
4.1. Основные понятия	91
4.2. Задачи	95
Синхронные генераторы	95
Синхронные двигатели и компенсаторы	107
Глава 5. Коллекторные машины постоянного тока	116
5.1. Основные понятия	116
5.2. Задачи	123
Обмотка якоря, ЭДС, реакция якоря	123
Генераторы постоянного тока	128
Двигатели постоянного тока	129
Приложения	147
Список литературы	154

Учебное издание

Кацман Марк Михайлович

Сборник задач по электрическим машинам

Учебное пособие

Редактор Т. Ф. Мельникова

Технический редактор Н. И. Горбачева

Компьютерная верстка: Л. А. Вишнякова

Корректоры Л. А. Богомолова, Г. Н. Петрова

Изд. № 104105149. Подписано в печать 22.04.2008. Формат 60×90/16.
Гарнитура «Петербург». Бумага тип. № 2. Печать офсетная. Усл. печ. л. 10,0.
Тираж 1 500 экз. Заказ № 26448.

Издательский центр «Академия». www.academia-moscow.ru
Санитарно-эпидемиологическое заключение № 77.99.02.953.Д.004796.07.04 от 20.07.2004.
117342, Москва, ул. Бултерова, 17-Б, к. 360. Тел./факс: (495) 330-1092, 334-8337.

Отпечатано в полном соответствии с качеством диапозитивов, предоставленных
издательством в ОАО «Саратовский полиграфкомбинат».
410004, г. Саратов, ул. Чернышевского, 59. www.sarprk.ru.