

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

МОСКОВСКИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

О.В. БАВРИН, В.Я. БЕСПАЛОВ, В.И. ИЗВЕКОВ, С.В. ШИРИНСКИЙ

**ОБМОТКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА
АСИНХРОННЫЕ МАШИНЫ**

Методическое пособие
к расчетному заданию
по дисциплинам:
"Электромеханика", "Электрические машины"
для студентов, обучающихся по направлениям
"Электротехника, электромеханика, электротехнологии",
"Электроэнергетика"

Москва

Издательский дом МЭИ

2007

УДК
621.313
О 196

*Утверждено учебным управлением МЭИ
Подготовлено на кафедре электромеханики*

Рецензент: д.т.н., проф. Кузнецов В.А., Юргенсон Т.С.

Обмотки электрических машин переменного тока.
Асинхронные машины. О.В. Баврин, В.Я. Беспалов, В.И. Извеков,
С.В. Ширинский – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – 16 с.

Представлены задачи, позволяющие студентам овладеть методами построения основных схем трехфазных обмоток вращающихся электрических машин переменного тока и найти пространственные распределения создаваемых ими магнитодвижущих сил, а также рассчитать обмоточные коэффициенты. Получаемые при этом навыки используются в дальнейшем при выполнении расчетного задания по синхронным машинам и курсовых проектов по асинхронным и синхронным машинам.

В разделе 2 расчетного задания поясняются методы решения задач теории асинхронных электродвигателей, работающих в номинальных и ненормальных режимах.

Данное расчетное задание выполняется студентами ИЭТ и ИЭЭ. Задание позволит студентам практически усвоить разделы "Синхронные машины" и "Асинхронные машины" теоретического курса. При выполнении задания студенты должны пользоваться литературой, указанной в конце каждого пункта.

РАСЧЁТНОЕ ЗАДАНИЕ

I. ОБМОТКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА. ЭДС В ОБМОТКАХ СТАТОРА И РОТОРА

1.1. Начертить схему-развертку трехфазной обмотки для варианта № ____ (табл. 1).

1.2. Построить кривую пространственного распределения МДС обмотки п.1.1 при симметричной системе токов в ее фазах.

1.3. Определить обмоточные коэффициенты 1, 5, 7, 11 и 13 пространственных гармоник для обмотки п. 1.1.

1.4. Определить частоты ЭДС, наведенных 1, 5, 7, 11 и 13 пространственными гармониками поля статора в обмотке ротора при скольжениях ротора относительно 1-ой гармоники, равных 1; 0 и 0,05, если частота синусоидального тока статора $f_1 = 50$ Гц.

1.5. Для трехфазного двигателя, обмоточные данные которого приведены в табл. 2, вариант № ____ определить ЭДС, наводимые в одной фазе обмотки статора ν -й гармоникой магнитного поля (для $\nu = 5, 7, 11$).

1.6. Найти значение Z_1 ближайшее, к полученному по данным табл. 1 и шаг обмотки статора, при которых ЭДС, наведенная в ней гармоникой $\nu = 5$ магнитного поля, равна нулю. Определить на сколько процентов в данном случае уменьшится первая гармоника ЭДС по сравнению с ЭДС обмотки, имеющей диаметральный шаг. Решить эту же задачу для $\nu = 7$.

1.7. Асинхронный двигатель питается от сети частотой 50 Гц. При неподвижном роторе в каждой фазе его обмотки наводится ЭДС $E_2 = 100$ В. Чему равна ЭДС, наводимая в фазе обмотки ротора при следующих частотах вращения ротора n и числах полюсов асинхронной машины $2p$:

n	1600	1500	3600	1200	940	1000	600
$2p$	2	4	2	6	6	8	8

Направление вращения ротора совпадает с направлением вращения поля.

1.8. По данным табл. 2 определить ЭДС, наведенную в обмотке ротора при неподвижном роторе, при номинальной частоте вращения и при частоте вращения, равной половине номинальной.

1.9. Для двигателя п. 1.8 определить частоту вращения ротора при моменте нагрузки, равном 0,6 от номинального.

II. АСИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

Для двигателя, данные которого приведены в табл. 2.:

2.1. Определить амплитуду первой гармоники МДС обмотки статора в номинальном режиме работы.

2.2. Для режима холостого хода определить индукцию B_δ в воздушном зазоре. Ток холостого хода принять равным 30% от $I_{1н}$, коэффициент насыщения магнитной цепи $k_\mu=1,5$, коэффициент воздушного зазора $k_\delta=1,2$. Распределение индукции в воздушном зазоре считать синусоидальным. Потерями в стали и механическими пренебречь.

2.3. а) Определить ток холостого хода и $\cos\phi$ двигателя, считая $E_1 = U_{1н}$, $k_\mu=1,5$ и $k_\delta=1,2$. Распределение индукции в воздушном зазоре синусоидальное. Потери холостого хода принять равным 5% от $P_{2н}$.

б) По данным п. а рассчитать ток холостого хода двигателя, у которого воздушный зазор увеличен на 50%, а коэффициент k_δ остался прежним.

2.4. На валу двигателя, ротор которого вращается по часовой стрелке, укреплен диск с секторами, число которых равно $2p$. Диск освещен неоновой лампой, питаемой от сети с частотой 50 Гц. Для номинального режима работы двигателя определить:

- а) в какую сторону вращаются секторы;
- б) в течение какого времени один сектор совершит полный оборот;
- в) частоту вращения сектора, об/мин;
- г) частоту тока ротора.

2.5. Определить $P_{эм}$, M , $P_{э2}$ и $P_{мех}$ в номинальном режиме работы. Принять $I_2' = 0,8$ о.е. и приведенное активное сопротивление обмотки ротора согласно номерам вариантов в табл. 2.:

варианты	1-4	5-8	9-12	13-16	17-28
r_2'	0,063	0,047	0,053	0,057	0,05

2.6. Определить электрические потери в цепи обмотки ротора $P_{э2}$ в номинальном режиме. Принять потери в стали статора $P_{с1} = 0,2\Sigma P$, где ΣP – суммарные потери двигателя. Активное сопротивление фазы обмотки статора $r_1 = 0,015$ о.е., добавочных сопротивлений в цепи ротора нет.

2.7. Определить величину добавочного активного сопротивления в цепи ротора, при котором:

а) начальный пусковой момент $M_{п}$ равен максимальному моменту M_m ;

б) частота вращения двигателя при номинальном моменте нагрузки равна половине номинальной;

в) частота вращения ротора равна $1,2 n_1$ при моменте, равном номинальному в генераторном режиме.

Параметры асинхронной машины, о.е., принять равными: $r_1 = 0,02$; $r_2' = 0,025$; $x_1 = 0,1$; $x_2' = 0,1$; $z_0 = x_0 = 3,0$; $C_1 = 1$.

2.8. Для режимов асинхронной машины, приведенных в пп. 2.7 а,б,в, определить ток статора при $U_1 = U_{1н}$.

2.9. Для режима асинхронного двигателя, приведенного в п. 2.7 б, определить к.п.д. Сравнить его с к.п.д. двигателя в номинальном режиме, приведенным в табл. 2.

2.10. Рассчитать и построить зависимость $n=f(M)$. Перегрузочную способность двигателя принять равной 2,0.

2.11. При напряжениях питания U_1 больше номинального на 10% и меньше номинального на 15% рассчитать:

а) кратности максимального M_m/M_n и пускового $M_{п}/M_n$ моментов, пускового тока $I_{п}/I_n$;

б) момент, развиваемый двигателем, и потребляемый из сети ток при номинальном скольжении, сравнив их с номинальными из табл. 2;

в) скольжение и потребляемый из сети ток при номинальном моменте нагрузки на валу M_n .

Насыщением магнитной цепи пренебречь.

2.12. При номинальном напряжении $U_{1н}$ определить те же величины, что и в п. 2.11 а,б,в, если частота f_1 сетевого напряжения больше номинальной на 10% и меньше номинальной на 10%.

2.13. Определить частоту биений тока статора асинхронного двигателя, у которого полные сопротивления фаз обмотки ротора неодинаковы. Скольжение принять равным номинальному.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

К пункту 1.1. Однослойные обмотки выполнять с диаметральным шагом $y = \tau$, двухслойные петлевые и волновые обмотки – с

укороченным шагом $y \approx \frac{5}{6} \tau$. Величины y и τ определить в количестве зубцовых делений и округлить до ближайшего целого значения.

Схемы-развертки однослойных и двухслойных петлевых обмоток

должны быть начерчены для всех трех фаз с выводами и обозначением начал (C_1, C_2, C_3) и концов (C_4, C_5, C_6) фаз.

Для волновых двухслойных обмоток достаточно начертить схему одной фазы, но необходимо показать начала, концы и поворотные соединения всех трех фаз. Паза на всех схемах должны быть пронумерованы.

[1,с.402-423; 2,с.242-266; 3,с.114-135]

К пункту 1.2. Построение кривых пространственного распределения МДС обмоток следует выполнить для двух моментов времени, соответствующих $i_a=I_{max}$ и $i_a=0$.

[1,с.430-452; 2,с.301-326]

К пункту 1.3. Определение обмоточных коэффициентов производится по формулам, полученным на основании векторных диаграмм для высших гармоник ЭДС.

[1,с.385-397; 2,с.274-300; 3,с.108-113]

К пункту 1.4. При определении частот ЭДС, индуктированных в обмотке ротора, следует учитывать, что частота вращения v -ой гармоники МДС в v раз меньше, а число полюсов в v раз больше величин для 1-ой гармоники.

Высшие пространственные гармоники МДС с номерами $v=6k+1$, где $k=1,2,3\dots$, вращаются в том же направлении, что и 1-я гармоника. Относительно ротора они вращаются со скоростью

$$\frac{n_1}{v} - n = \frac{n_1}{v} - n_1(1-s),$$

где n_1 - синхронная частота вращения 1-й гармоники МДС; n - частота вращения ротора; s - скольжение ротора относительно 1-й гармоники. Отсюда следует, что частоты ЭДС, наведенных этими гармониками поля в обмотке ротора, определяются по формуле

$$f_{2vпр} = f_1(1-v(1-s)).$$

Если ротор вращается быстрее прямо вращающейся гармоники, его скольжение относительно нее s_v отрицательно, что соответствует генераторному режиму для этой гармоники. Отрицательной будет и частота ЭДС, наведенной ею в роторе, т.к. $f_{2vпр} = s_v f_1$.

Высшие пространственные гармоники МДС с номерами $v=6k-1$, где $k=1,2,3\dots$, вращаются в направлении, противоположном направлению вращения 1-й гармоники и ротора. Относительно ротора они вращаются

со скоростью

$$\frac{n_1}{v} + n = \frac{n_1}{v} + n_1(1-s).$$

Частоты ЭДС, наведенных этими гармониками поля в обмотке ротора, определяются по формуле

$$f_{2\nu\text{об}} = f_1(1 + \nu(1-s)).$$

По отношению к обратновращающимся гармоникам ротор оказывается в режиме электромагнитного тормоза, для которого всегда $s_\nu > 0$ и $f_{2\nu\text{об}} > 0$.

[1, с.521-529; 2, с.492-495]

К пункту 1.5. Вначале следует определить амплитуду первой гармоники магнитного потока Φ_{m1} , Вб, пренебрегая падением напряжения на полном сопротивлении обмотки статора. При этом условии можно записать

$$U_{1H} = 4,44 f_1 w_1 k_{\text{об1}} \Phi_{m1}, \text{ В.}$$

Амплитуды высших гармоник потока $\Phi_{m\nu}$ принять равными $\frac{\Phi_{m1}}{\nu}$.

Обмоточные коэффициенты рассчитывается аналогично п. 1.3.
[1, с.395-397; 2, с.345-350]

К пункту 1.6. При выполнении этого пункта задания условно считать, что для всех вариантов табл. 1 обмотки двухслойные, т.е. допускают укорочение шага.

ν -я гармоника поля не наводит ЭДС в обмотке, если ее шаг u укорочен на $\frac{\tau}{\nu}$, где τ – полюсное деление 1-й гармоники поля. Выразив τ в количестве зубцовых делений, следует подобрать такое целое значение u , чтобы обмоточный коэффициент ν -й гармоники был минимальным, если возможно – равным нулю, а Z_1 – целым числом.

[1, с.395-402; 2, с.345-350]

К пунктам 1.7 и 1.8. ЭДС в фазе обмотки ротора E_{2s} , наводимая при любом скольжении, связана с ЭДС, наводимой при неподвижном роторе E_2 соотношением $E_{2s} = sE_2$.

[1, с.484-488; 2, с.429-495]

К пункту 1.9. Для определения частоты вращения ротора при моменте нагрузки меньше номинального рабочий участок механической характеристики считать прямой линией.

[1,с.509-518; 2,с.518-523]

К пункту 2.1. Амплитуда первой пространственной гармоники МДС трехфазной обмотки статора связана с действующим значением синусоидального тока в обмотке соотношением

$$F_1 = 1,35 I_1 w_1 k_{об1} / p, \text{ А.}$$

F_1 – величина МДС, приходящейся на два полюса.

[1,с.438-446; 2,с.309-314]

К пункту 2.2. Если пренебречь потерями в стали и механическими, ток холостого хода асинхронного двигателя будет содержать только реактивную (намагничивающую) составляющую.

Коэффициентом насыщения называется отношение

$$k_{\mu} = \frac{F_1}{F_{\delta}},$$

где F_{δ} – МДС воздушного зазора.

В свою очередь при размерностях F_{δ} (А), B_{δ} (Вб), δ (мм) падение магнитного потенциала на два воздушных зазора равно

$$F_{\delta} = 1,6 B_{\delta} k_{\delta} \delta \cdot 10^3.$$

[1,с.41-45; 2,с.479-484; 3,с.170-175]

К пункту 2.3. Активная составляющая тока холостого хода равна

$$I_{0a} = \frac{P_0}{3U_{1\text{нф}}},$$

где P_0 – потери холостого хода, $U_{1\text{нф}}$ – номинальное фазное напряжение.

Для определения реактивной (намагничивающей) составляющей тока холостого хода сначала следует найти амплитуду магнитного потока, которая при синусоидальном распределении поля в воздушном зазоре равна

$$\Phi_{m1} = \frac{E_1}{4,44 f_1 w_1 k_{об1}}, \text{ Вб.}$$

Индукция в воздушном зазоре

$$B_{\delta} = \frac{\Phi_{m1}}{\alpha_{\delta} \tau l_1}, \text{ Тл.}$$

Для пространственной синусоиды поля коэффициент полюсного перекрытия $\alpha_\delta=0,64$.

Далее по формулам п. 2.2 определяются F_δ и F_1 . Намагничивающий ток будет

$$I_{0p} = \frac{pF_1}{1,35w_1k_{об1}}, \text{ А.}$$

Ток холостого хода и $\cos \varphi_0$

$$I_0 = \sqrt{I_{0a}^2 + I_{0p}^2}; \quad \cos \varphi_0 = \frac{I_{0a}}{I_0}.$$

[1,с.479-482; 2,с.484-486; 3,с.385-396]

К пункту 2.4. Если на торце вала двигателя закрепить диск с $2p$ черными и $2p$ белыми секторами и освещать его неоновой лампой, включенной в сеть, питающую статор, то при синхронной частоте вращения ротора звезда секторов будет казаться неподвижной в пространстве. При частоте вращения роторе меньше синхронной $n < n_1$ звезда секторов будет вращаться с разностью частот $n_1 - n$ против направления вращения ротора, а при частоте вращения роторе больше синхронной $n > n_1$ звезда секторов будет вращаться с той же разностью частот, но по направлению вращения ротора. Частота тока ротора может быть определена по числу оборотов звезды секторов $n_{зв}$ за 1 мин.

Так как относительная частота вращения ротора равна разности частот вращающегося поля статора n_1 и ротора n , то

$$\frac{n_1 - n}{60} = \frac{n_{зв}}{60}.$$

Частота тока ротора

$$f_2 = \frac{pn_{зв}}{60}.$$

К пункту 2.5. Электромагнитная мощность $P_{эм}$ асинхронного двигателя, определенная по схеме замещения, равна

$$P_{эм} = m_1(I_2')^2 \frac{r_2'}{s}, \text{ Вт.}$$

Электромагнитный момент

$$M = \frac{P_{эм}}{\omega_1}, \text{ Нм,}$$

где синхронная угловая частота вращения магнитного поля статора

$$\omega_1 = \omega / p = 2\pi f_1 / p.$$

Электрические потери в обмотке ротора $P_{э2}$ равны

$$P_{э2} = m_1 (I_2')^2 r_2', \text{ Вт.}$$

Механические потери $P_{мех}$ асинхронного двигателя определяются как

$$P_{мех} = P_{эм} - P_{э2} - P_{2н},$$

где $P_{2н}$ – номинальная мощность на валу двигателя.

Базовое значение сопротивления $Z_{баз}$ следует определить по номинальным данным табл. 2 как $Z_{баз} = U_{1нф} / I_{1нф}$.

[1, с.501-510; 2, с.518-532; 3, с.411-417]

К пункту 2.6. При расчете $P_{э2}$ следует определить активную мощность P_1 , потребляемую двигателем из сети в режиме номинальной нагрузки. Затем, вычтя из этой мощности потери в стали статора $P_{с1}$ и электрические потери $P_{э1}$ в обмотке статора, находят электромагнитную мощность $P_{эм}$. Электрические потери ротора прямо пропорциональны скольжению s асинхронного двигателя и $P_{эм}$.

[1, с.500-501; 2, с.502-506]

К пункту 2.7.

а) Добавочное сопротивление, приведенное к цепи статора, которое следует ввести в цепь ротора для получения $M_{п} = M_m$ определяется из равенства $s_{кр} = 1$, т.е. из условия получения максимального момента при пуске двигателя. Это сопротивление равно

$$r'_{доб} = \frac{1}{C_1} \sqrt{r_1'^2 + (x_1 + C_1 x_2')^2} - r_2'.$$

При расчете следует принять $C_1 = 1$.

Для определения неприведенного сопротивления $r'_{доб}$, вводимого в роторную цепь, следует воспользоваться уравнением

$$r'_{доб} = r_{доб} \frac{m_2}{m_1} \left(\frac{I_2}{I_2'} \right)^2 = r_{доб} \frac{m_1}{m_2} \left(\frac{w_1 k_{об1}}{w_2 k_{об2}} \right)^2.$$

Здесь m_1 и m_2 – числа фаз соответственно статора и ротора; w_1 и w_2 – числа витков обмоток статора и ротора; $k_{об1}$ и $k_{об2}$ – обмоточные коэффициенты статора и ротора, которые находятся по обмоточным данным табл. 2.

б) При определении величины добавочного сопротивления в цепи

ротора, при котором номинальному моменту соответствует частота вращения, равная половине синхронной, необходимо знать величину номинального скольжения двигателя (см. табл. 2). Согласно формулам п. 3.1 электромагнитный момент равен

$$M = \frac{pm_1}{\omega} (I_2')^2 \frac{r_2'}{s}.$$

Поскольку при включении в цепь ротора добавочного сопротивления момент на валу двигателя остается постоянным, то должна оставаться неизменной величина сопротивления цепи ротора

$$\frac{r_2}{s_H} = \frac{r_2 + r_{\text{доб}}}{s}.$$

Для $s=0,5$ получаем

$$r_{\text{доб}} = r_2 \left(\frac{0,5}{s_H} - 1 \right).$$

в) Определяется скольжение, соответствующее частоте вращения ротора, равной $1,2n_1$. Затем используются соотношения, приведенные в предыдущем пункте.

[1,с.568-570, 577-578; 2,с.525-527, 564-565]

К пункту 2.8. Для определения токов статора, соответствующих режимам работы асинхронной машины, приведенным в пп. 2.7 а,б,в, необходимо воспользоваться параметрами Г-образной схемы замещения, определить токи (активную и реактивную составляющие) в ее ветвях, а затем просуммировать их.

[1,с.497-500; 2,с.512-517; 3,с.418-425]

К пункту 2.9. Используя параметры схемы замещения, следует определить потери асинхронного двигателя при $s=0,5$. Механические потери принять равными

$$P_{\text{мех}} \approx 0,01P_{2H}.$$

При скольжении $s=0,5$ сталь ротора перемагничивается с частотой 25 Гц, поэтому следует учесть потери P_{c2} в стали ротора. Эти потери можно принять равными

$$P_{c2} \approx 0,3P_{c1}.$$

Добавочными потерями в стали ротора при расчете к.п.д. следует пренебречь.

[1,с.500-502; 2,с.502-506; 3,с.411-417]

К пункту 2.10. Построение механической характеристики асинхронного двигателя следует проводить, используя упрощенную формулу Клосса. По данным табл. 2 определяются номинальное скольжение s_n двигателя и его номинальный момент M_n . По заданной перегрузочной способности двигателя определяется максимальный момент M_m и критическое скольжение $s_{кр}$, соответствующее этому моменту. Задавая значения скольжения в пределах $0 < s < s_{кр}$, получают значения момента для устойчивой части механической характеристики. [1, с.509-518; 2, с.525-527]

К пункту 2.11. При определении кратностей максимального M_m/M_n и пускового $M_{п}/M_n$ моментов следует воспользоваться параметрами схемы замещения асинхронной машины в о.е. из п. 2.7, которые переводятся в значения в Ом. Номинальный момент двигателя определяется подстановкой номинального скольжения, полученного по данным табл. 2, в формулу момента

$$M = \frac{pm_1 U_{\text{нф}}^2 r_2'}{\omega s \left[\left(r_1 + \frac{r_2'}{s} \right)^2 + (x_1 + x_2')^2 \right]}, \text{ Нм.}$$

Подставляя в формулу момента скольжение, равное критическому, которое определяется по упрощенной формуле

$$s_{\text{кр}} = \pm \frac{r_2'}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_2')^2}},$$

получим выражение для максимального момента M_m

$$M_m = \frac{pm_1 U_{\text{нф}}^2}{2\omega \left[\pm r_1 + \sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_2')^2} \right]}, \text{ Нм.}$$

Подставляя в формулу момента M скольжение $s=1$, можно получить величину пускового момента $M_{п}$.

По схеме замещения находятся величины номинального тока (при $s=s_n$) и пускового тока (при $s=1$).

Кратности максимального M_m/M_n и пускового $M_{п}/M_n$ моментов пропорциональны квадрату напряжения питания, кратность пускового тока пропорциональна U_1 . При выполнении задания п. 2.11 следует

построить зависимость момента M и потребляемого из сети тока I_1 асинхронного двигателя от скольжения s . Для этого нужно задаться пятью-шестью значениями s в пределах $0 < s < s_{кр}$, определить по схеме замещения токи в ее ветвях и построить графики $M, I_1 = f(s)$ при $U_1 = (0,9; 1,0; 1,1)U_{1н}$. Затем находят s и I_1 , соответствующие номинальному моменту M_n .

[1, с.509-518; 2, с.525-527]

К пункту 2.12. От частоты f_1 питающей сети зависит синхронная угловая частота вращения магнитного поля ω_1 и величины индуктивных сопротивлений схемы замещения. Поэтому с изменением f_1 меняются величины максимального момента M_m , критического скольжения $s_{кр}$, пусковых значений тока I_n и момента M_n .

Следует также учесть изменение потерь в стали и механических. Потери в стали пропорциональны квадрату индукции. Индукция B обратно пропорциональна частоте при постоянном сетевом напряжении. Кроме того с достаточной степенью точности можно принять, что потери в стали зависят от частоты перемагничивания f_1 как $P_c \sim f_1^{1,3}$. Механические потери двигателя следует считать пропорциональными квадрату частоты вращения ротора, которая пропорциональна частоте питающей сети. Поэтому механические потери $P_{мех} \sim f_1^2$.

[1, с.509-518, 594-595; 2, с.525-527]

К пункту 2.13. При неодинаковых сопротивлениях фаз обмотки ротора токи в них будут различными. Несимметричную систему токов ротора можно разложить на составляющие прямой и обратной последовательностей; причем те и другие имеют частоту

$$f_2 = sf_1.$$

Токи прямой последовательности ротора взаимодействуют с прямовращающимся полем статора, создавая момент прямой последовательности двигателя. Поле прямой последовательности токов ротора наводит в обмотке статора ЭДС с частотой f_1 .

Токи обратной последовательности ротора создают поле, вращающееся относительно ротора со скоростью

$$n_{2р} = \frac{60f_2}{p} = sn_1.$$

Сам ротор вращается в обратном направлении со скоростью

$$n = (1 - s)n_1$$

Поэтому скорость вращения обратного поля ротора относительно

статора равна

$$n_2 = n - n_{2p} = (1 - 2s)n_1.$$

Это поле индуцирует в обмотке статора ЭДС с частотой

$$f_{2c} = \frac{pn_2}{60} = (1 - 2s)f_1.$$

Эта ЭДС вызовет токи в обмотке статора, замыкающиеся через сеть. При рабочих скольжениях, в том числе – в номинальном режиме, частота этих токов меньше частоты сети, они складываются с основными токами фаз статора (прямой последовательности), образуя биения. Частота биений тока статора равна

$$f_1 - f_{2c} = f_1 - (1 - 2s)f_1 = 2sf_1.$$

[1, с.600-602; 2, с.590-593]

ЛИТЕРАТУРА

1. Вольдек А.И. Электрические машины.– Л.: Энергия, 1978, 832 с.
2. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины. Том 1: учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательство МЭИ, 2004, – 652[6]с.:ил.
3. Проектирование электрических машин: Учебник для вузов / И.П. Копылов, Б.К. Клоков, В.П. Морозкин, Б.Ф. Токарев // Под. ред. И.П. Копылова. – 3-е изд., испр. и доп. – М.: Высшая школа, 2002. – 757 с.:ил.

Таблица 1.

Исходные данные для построения
схемы-развертки трехфазной обмотки

№	Тип обмотки	$2p$	q	a
1	Однослойная концентрическая двухплоскостная обмотка	4	2	1
2	Однослойная концентрическая двухплоскостная обмотка	6	2	1
3	Однослойная концентрическая двухплоскостная обмотка	4	2	2
4	Однослойная трехплоскостная обмотка	2	4	1
5	Однослойная трехплоскостная обмотка	2	6	1
6	Однослойная цепная обмотка	4	2	1
7	Однослойная цепная обмотка	4	3	1
8	Петлевая двухслойная обмотка	2	3	1
9	Петлевая двухслойная обмотка	2	3	2
10	Петлевая двухслойная обмотка	2	4	1
11	Петлевая двухслойная обмотка	2	4	2
12	Петлевая двухслойная обмотка	2	5	1
13	Петлевая двухслойная обмотка	2	5	2
14	Петлевая двухслойная обмотка	4	2	1
15	Петлевая двухслойная обмотка	4	2	2
16	Петлевая двухслойная обмотка	4	3	1
17	Петлевая двухслойная обмотка	4	3	2
18	Петлевая двухслойная обмотка	4	3	4
19	Петлевая двухслойная обмотка	4	4	1
20	Петлевая двухслойная обмотка	4	4	2
21	Петлевая двухслойная обмотка	4	4	4
22	Петлевая двухслойная обмотка	6	2	1
23	Петлевая двухслойная обмотка	6	2	2
24	Петлевая двухслойная обмотка	6	3	3
25	Волновая двухслойная обмотка	2	4	1
26	Волновая двухслойная обмотка	4	2	1
27	Волновая двухслойная обмотка	4	2	2
28	Волновая двухслойная обмотка	6	2	1

Таблица 2

Таблица номинальных величин, размеров и обмоточных данных трехфазных асинхронных двигателей с контактными кольцами

№ варианта	Номинальные величины					Данные ротора		Основные размеры			Обмоточные данные статора							Обмоточные данные фазного ротора								
	Мощность на валу, кВт	Напряжение, В	К.п.д., %	Коэффициент мощности	Частота вращения, об/мин	Напряжение, В	Ток, А	Внутренний диаметр статора, мм	Длина, статора / длина ротора, мм	Зазор, мм	Число пазов статора	Схема соединения обмотки	Диаметр провода (голый), мм	Число электр.провод. в пазу / всего в пазу	Число параллельных ветвей	Число последоват. соединен. витков.фазы	Шаг по пазам	Средняя длина витка, мм	Число пазов ротора	Размеры провода (голый), мм	Полное число проводников в пазу	Шаг по пазам	Число параллельных ветвей	Схема соединения обмотки	Число послед. соединен. витков фазы	Средняя длина витка, мм
	P_{2H}	U_{1H}	η_H	$\cos\varphi_H$	n_H	U_2	I_2	D	l_1/l_2	δ	Z_1		d_1	$u_{п}/u_{пнэл}$	a_1	w_1	y_1	l_{cp1}	Z_2	$a \times b$	$u_{п}$	y_2	a_2		w_2	l_{cp2}
1	10	220/380	85	0,82	1420	160	40	180	135/138	0,55	36	Δ/Y	1,25	38/76	2	114	1-8	324	48	2,1×3,8	6	1-11	1	Y	48	341
2	10	500	85	0,82	1420	160	40	180	135/138	0,55	36	Y	1,08	50/100	2	150	1-8	324	48	2,1×3,8	6	1-11	1	Y	48	341
3	13	220/380	86	0,82	1420	198	46	180	165/168	0,55	36	Δ/Y	1,45	30/60	2	90	1-8	354	48	2,1×3,8	6	1-11	1	Y	48	371
4	13	500	86	0,82	1420	198	46	180	168/168	0,55	36	Y	1,25	38/76	2	114	1-8	354	48	2,1×3,8	6	1-11	1	Y	48	371
5	7,5	220/380	84	0,82	960	140	35	206	150/153	0,4	54	Δ/Y	1,5	36/36	2	162	1-8	300	36	2,1×4,7	10	1-6	1	Y	60	338
6	7,5	500	84	0,82	960	140	35	206	150/153	0,4	54	Y	1,3	48/48	2	216	1-8	300	36	2,1×4,7	10	1-6	1	Y	60	338
7	10	220/380	85	0,83	960	100	36	206	190/193	0,4	54	Δ/Y	1,2	28/56	2	126	1-8	340	36	2,1×4,7	10	1-6	1	Y	60	378
8	10	500	85	0,83	960	100	36	206	190/193	0,4	54	Y	1,04	38/76	2	170	1-8	340	36	2,1×4,7	10	1-6	1	Y	60	378
9	5,5	220/380	82	0,72	710	115	32	206	150/153	0,4	56	Δ/Y	1,4	42/42	2	190	1-7	288	36	2,1×4,7	10	1-5	1	Y	60	311
10	5,5	500	82	0,72	710	115	32	206	150/153	0,4	56	Y	1,2	56/56	2	250	1-7	288	36	2,1×4,7	10	1-5	1	Y	60	311

	P_{2H}	U_{1H}	η_H	$\cos\varphi_H$	n_H	U_2	I_2	D	l_1/l_2	δ	Z_1		d_1	$u_{II}/u_{II}n_{эл}$	a_1	w_1	y_1	l_{cp1}	Z_2	$a \times b$	u_{II}	y_2	a_2		w_2	l_{cp2}
11	7,5	220/380	83	0,72	710	150	37,5	206	190/193	0,4	56	Δ/Y	1,62	32/32	2	144	1-7	328	36	2,1×4,7	10	1-5	1	Y	60	351
12	7,5	500	83	0,72	710	150	37,5	206	190/193	0,4	56	Y	1,4	42/42	2	190	1-7	328	36	2,1×4,7	10	1-5	1	Y	60	351
13	17	220/380	88	0,83	1430	226	51,4	214	165/168	0,7	36	Δ/Y	1,3	28/84	2	84	1-8	410	24	1,81×3,28	12	1-6	1	Y	48	405
14	17	500	88	0,83	1430	226	51,4	214	165/168	0,7	36	Y	1,12	38/76	2	114	1-8	410	24	1,81×3,28	12	1-6	1	Y	48	405
15	22	220/380	88,5	0,83	1430	228	52	214	205/208	0,7	36	Δ/Y	1,5	22/66	2	66	1-8	450	24	1,81×3,28	12	1-6	1	Y	48	445
16	22	500	88,5	0,83	1430	228	52	214	205/208	0,7	36	Y	1,3	30/90	2	90	1-8	450	24	1,81×3,28	12	1-6	1	Y	48	445
17	13	220/380	87	0,83	960	188	47,8	245	165/168	0,5	54	Δ/Y	1,35	28/56	2	126	1-8	355	36	2,44×6,4	10	1-6	1	Y	60	382
18	13	500	87	0,83	960	188	47,8	245	165/168	0,5	54	Y	1,16	38/76	2	170	1-8	355	36	2,44×6,4	10	1-6	1	Y	60	382
19	17	220/380	88	0,84	960	240	48,2	245	205/208	0,5	54	Δ/Y	1,5	22/44	2	100	1-8	395	36	2,44×6,4	10	1-6	1	Y	60	422
20	17	500	88	0,84	960	240	48,2	245	205/208	0,5	54	Y	1,3	30/60	2	136	1-8	395	36	2,44×6,4	10	1-6	1	Y	60	422
21	10	220/380	84,5	0,72	715	158	46,3	245	165/168	0,5	56	Δ/Y	1,25	32/64	2	144	1-7	335	36	2,44×6,4	10	1-5	1	Y	60	363
22	10	500	84,5	0,72	715	158	46,3	245	165/168	0,5	56	Y	1,08	42/84	2	190	1-7	335	36	2,44×6,4	10	1-5	1	Y	60	363
23	13	220/380	85,5	0,72	715	196	48,5	245	245/248	0,5	56	Δ/Y	1,4	26/52	2	116	1-7	275	36	2,44×6,4	10	1-5	1	Y	60	403
24	13	500	85,5	0,72	715	196	48,5	245	245/248	0,5	56	Y	1,4	34/68	2	152	1-7	275	36	2,44×6,4	10	1-5	1	Y	60	403
25	30	220/380	89	0,84	960	125	150	285	190/196	0,6	72	Δ/Y	1,35	20/60	3	104	1-11	415	81	2,63×15,6	2	1-15	1	Y	28	459
26	30	500	89	0,84	960	125	150	285	190/196	0,6	72	Y	1,16	26/78	3	104	1-11	415	81	2,63×15,6	2	1-15	1	Y	28	459
27	22	220/380	87,5	0,79	720	95	150	285	190/196	0,6	72	Δ/Y	1,4	18/54	2	108	1-8	375	84	2,63×15,6	2	1-12	1	Y	28	441
28	22	500	87,5	0,79	720	95	150	285	190/196	0,6	72	Y	1,2	24/72	2	144	1-8	375	84	2,63×15,6	2	1-12	1	Y	28	441

Примечания: 1. Номинальная частота тока статора для всех двигателей $f_1=50$ Гц.

2. Значения $\cos\varphi_H$, η_H , n_H , U_2 , I_2 , приведенные в таблице, следует рассматривать как ориентировочные.

3. Коэффициент заполнения пакета сталью для статора и ротора принять равным 0,95. Пакеты не имеют радиальных вентиляционных каналов

4. Статорные и роторные обмотки – двухслойные петлевые.

СОДЕРЖАНИЕ

РАСЧЁТНОЕ ЗАДАНИЕ.....	3
I. ОБМОТКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА. ЭДС В ОБМОТКАХ СТАТОРА И РОТОРА.....	
3	3
II. АСИНХРОННЫЕ МАШИНЫ.....	
4	4
МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ	5
ЛИТЕРАТУРА.....	14
Таблица 1.	15
Таблица 2	16

Учебное издание

Баврин Оскар Васильевич
Беспалов Виктор Яковлевич
Извеков Владимир Иванович
Ширинский Сергей Владимирович

ОБМОТКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА
 АСИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

Методическое пособие
 к расчетному заданию
 по дисциплинам:
 "Электромеханика", "Электрические машины"
 для студентов, обучающихся по направлениям
 "Электротехника, электромеханика, электротехнологии",
 "Электроэнергетика"

Редактор издательства

Темплан издания МЭИ 2007 (II), метод.	Подписано к печати
Печать офсетная	Формат 60×84/16 Физ. печ.л.
Тираж 200 экз.	Изд. № Заказ

ЗАО "Издательский дом МЭИ", 111250, Москва, Красноказарменная ул., д.14
 Отпечатано